



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Rauheitsreduktion lasergesinterter Substrattopographien mittels mehrlagigen Inkjet-Drucks

**am Fachbereich Maschinenbau
der Technischen Universität Darmstadt**

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor Ingenieur
(Dr.-Ing.)

genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Martina Stefanie Gayduschek, M.Sc.

Erstgutachter:
Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
Prof. Dr.-Ing. Thilo Bein

Darmstadt 2019

Gayduschek, Martina: Rauheitsreduktion lasergesinterter Substrattopographien mittels mehrlagigen Inkjet-Drucks

Darmstadt, Technische Universität Darmstadt

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2020

URN der Dissertation: urn:nbn:de:tuda-tuprints-96294

Tag der mündlichen Prüfung: 25.06.2019

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Für Ashanti,
weil du mich treu begleitet hast.

Kurzfassung

Der Gestaltungsfreiheit einer Bauteilgeometrie ist durch das selektive Lasersintern kaum Grenzen gesetzt. Der monochrome, visuelle Eindruck und die haptische Wirkung eines so gefertigten Bauteils beinhaltet jedoch Entwicklungspotential. Die Inkjet-Technologie bildet ein großes Farbspektrum auf Oberflächen ab und wirkt damit der Limitierung des monochromen, visuellen Eindrucks entgegen. Die haptische Wirkung wird durch das Einebnen der Substrattopographie verbessert. Ziel dieser Arbeit ist es, dieses Einebnen mit Hilfe des mehrlagigen Inkjet-Drucks zu realisieren. Hierbei gilt es die wissenschaftliche Fragestellung zu klären, wie sich das mehrfache Bedrucken mit der Inkjet-Technologie auf die Substrattopographie von lasergesinterten Bauteilen auswirkt.

Für die Untersuchung werden lasergesinterte Platten herangezogen und die damit verbundene, undefinierte Substrattopographie in eine definierte Substrattopographie, die einzelne, periodisch angeordnete Strukturelemente besitzt, mittels Fräsen überführt. Diese Substrattopographien werden mehrfach mit dem Inkjet-Drucker überdruckt. Die Veränderung der Topographie wird mit zunehmendem Druckdurchgang untersucht.

Auf Basis von De Gennes Modell der Fluidodynamik wird zunächst ein mathematisches Modell entwickelt, das den exponentiellen Glättungsverlauf der lasergesinterten Substrattopographie durch den mehrlagigen Inkjet-Druck mit zunehmendem Druckdurchgang beschreibt. Hierbei stellt sich heraus, dass die arithmetische Mittenrauheit S_a unter anderem von den Einflussgrößen der Nivellierungszeit der Tinte und der Schichtdicke des Tintenfilms abhängig ist. Anschließend wird die Auswirkung der Einflussgrößen auf den Glättungsverlauf näher betrachtet. Hierfür wird, neben den aus dem mathematischen Modell identifizierten Einflussgrößen der Nivellierungszeit der Tinte und der aufgedruckten Schichtdicke, der Einfluss des Neigungswinkels einzelner Strukturelemente der definierten Substrattopographie und der Auftragsform der Tinte auf den Glättungsverlauf analysiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass ein geringer Neigungswinkel einzelner Strukturelemente, eine kurze Nivellierungszeit der Tinte und eine gering aufgedruckte Schichtdicke den Glättungsverlauf verlangsamen. Folglich wird die Rauheit der lasergesinterten Substrattopographie weniger stark reduziert. Zusätzlich zeigt die Auftragsform des selektiven Bedruckens, in der nur die Täler mit Tinte gefüllt werden, dass diese Auftragsform Ausbaupotential besitzt. Die subjektive Wahrnehmung der Substrattopographie wird zuletzt durch die objektiven Rauheitskenngrößen beschrieben. Es zeigt sich, dass die arithmetische Mittenrauheit S_a das haptische Empfinden repräsentieren kann, jedoch keine Aussage über den visuellen Eindruck der Druckbildqualität liefert. Hingegen spiegelt das Spk/Svk -Verhältnis und das Svk/Sk -Verhältnis der Substrattopographie die subjektive, visuelle Wertigkeit wider. Aus den Untersuchungen geht hervor, dass die vier Einflussgrößen sowohl das haptische Empfinden wie auch den visuellen Eindruck der Substrattopographie verbessern.

Abstract

The design freedom of a part geometry is hardly limited by selective laser sintering. The monocolour, visual impression and the haptic effect of such a part, however, contains development potential. Inkjet technology reproduces a large colour spectrum on surfaces and thus counteracts the limitation of the monocolour, visual impression. The haptic effect is improved by reducing the roughness of the substrate topography. The aim of this work is to achieve this levelling with the aid of multi-layer inkjet printing. The scientific question is to clarify how multi-layer inkjet printing affects the substrate topography of laser-sintered parts.

For the investigation, laser-sintered plates are used and the associated undefined substrate topography is transferred by milling into a defined substrate topography which has individual, periodically arranged structural elements. These substrate topographies are printed several times with the inkjet printer. The change of the topography with increasing number of prints is investigated.

On the basis of De Genne's model of fluid dynamics, a mathematical model is first developed which describes the exponential smoothing process of the laser-sintered substrate topography through multi-layer inkjet printing with increasing number of prints. Here it turns out that the arithmetic center roughness S_a depends among other things on the influencing variables of the levelling time of the ink and the layer thickness of the ink film. The effect of the influencing variables on the smoothing process is then examined in more detail.

For this purpose, the influence of the inclination angle of individual structural elements of the defined substrate topography and the application form of the ink on the smoothing process is analysed in addition to the influencing variables of the levelling time of the ink and the printed layer thickness identified from the mathematical model. The results of the investigations show that a low angle of inclination of individual structural elements, a short levelling time of the ink and a low layer thickness printed on the surface slow down the smoothing process. Consequently, the roughness of the laser-sintered substrate topography is reduced less. In addition, the selective inkjet-printing form, in which only the valleys are filled with ink, shows that this form of application has potential for expansion. The subjective perception of the substrate topography is last described by the objective roughness parameters. It turns out that the arithmetic center roughness S_a can represent the haptic sensation but does not provide a statement about the visual impression of the print image quality. On the other hand, the S_{pk}/S_{vk} ratio and the S_{vk}/S_k ratio of the substrate topography reflect the subjective visual value. The investigations show that the four influencing variables improve both the haptic sensation and the visual impression of the substrate topography.

Kurzfassung	I
Abstract	II
Verzeichnis verwendeter Kurzzeichen	VII
1 Einführung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Gesamtfertigungsprozess von lasergesinterten Bauteilen.....	3
2.2 Verfahrensprinzip des selektiven Lasersinterns	6
2.3 Verfahrensprinzip der Inkjet-Technologie.....	7
2.3.1 Druckvorstufe	8
2.3.2 Drucktechnologie.....	10
2.4 Fluidodynamik dünner Filme.....	13
2.5 Rauheitskenngrößen zur Beschreibung der Substrattopographie	22
3 Stand der Technik und Zielsetzung	26
3.1 Oberflächenqualität von lasergesinterten Bauteilen	26
3.1.1 Einfluss des Fertigungsprozesses	26
3.1.2 Einfluss des Pulvers	29
3.2 Oberflächenqualität des Inkjet-Drucks	32
3.2.1 Einfluss des Druck- und Trocknungsvorgangs.....	32
3.2.2 Einfluss des Substratmaterials	34
3.2.3 Einfluss der Substrattopographie.....	35
3.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit.....	37
4 Experimentelle Konfiguration (Set-Up)	41
4.1 Materialien	41
4.1.1 Substrat.....	41
4.1.2 Tinte	43
4.2 Equipment	44
4.2.1 Inkjet-Drucker für den Beschichtungsprozess.....	44
4.2.2 Konfokalmikroskop zur Topographieanalyse	44
4.3 Analysemethoden	45
4.3.1 Qualifizierung der Druckbildqualität mittels der Wertigkeit	45
4.3.2 Qualifizierung der Topographie mittels der Rauheitskenngrößen	46
4.4 Übersicht Versuchsreihen.....	47
4.4.1 Vorgehen der Kontaktwinkelmessung	47
4.4.2 Grundeinstellung	47
4.4.3 Versuchsspezifische Einstellungen	47

5	Ergebnisse zur theoretischen Modellbildung	56
5.1	Modellbildung des Glättungsverlaufs	56
5.1.1	Modellentwicklung	56
5.1.2	Voraussetzung für die Modellverifizierung	64
5.1.3	Modellverifizierung	65
5.1.4	Validität des Modells	76
5.1.5	Quintessenz	77
5.2	Modellbildung der partiellen Materialverteilung	78
5.2.1	Modellentwicklung	78
5.2.2	Modellverifizierung	82
5.2.3	Validität des Modells	93
5.2.4	Quintessenz	94
6	Ergebnisse zur Identifizierung der Einflussgrößen	96
6.1	Einfluss der Substratopographie auf den Glättungsverlauf.....	96
6.1.1	Analyse der unterschiedlichen Substratopographien	96
6.1.2	Glättungsverlauf auf unterschiedlichen Substratopographien	101
6.1.3	Quintessenz	124
6.2	Einfluss der Nivellierungszeit auf den Glättungsverlauf.....	126
6.2.1	Einfluss des Fließverhaltens der Tinte auf die Tintentopographie.....	126
6.2.2	Verlaufssimulation der minimal benötigten Nivellierungszeit.....	135
6.2.3	Verifizierung der Verlaufssimulation	138
6.2.4	Quintessenz	146
6.3	Einfluss der Schichtdicke auf den Glättungsverlauf.....	148
6.3.1	Verlaufssimulation der maximal möglichen Schichtdicke	148
6.3.2	Verifizierung der Verlaufssimulation	153
6.3.3	Glättungsverlauf unterschiedlicher mittlerer Schichtdicken	154
6.3.4	Quintessenz	166
6.4	Einfluss der Auftragsform auf den Glättungsverlauf	168
6.4.1	Glättungsverlauf beim selektiven Bedrucken	168
6.4.2	Einordnung in das Modell der Glättung.....	171
6.4.3	Quintessenz	174
7	Ergebnisse zur Qualitätssicherung des visuellen Eindrucks	175
7.1	Parametrisierung	176
7.1.1	Bewertung der visuellen Druckbildqualität	176
7.1.2	Qualifizierung mittels arithmetischer Mittenrauheit.....	177
7.1.3	Qualifizierung mittels tribologischer Parameter.....	179
7.1.4	Quintessenz	182

7.2	Analyse der Glättungsergebnisse anhand der Parametrisierung.....	183
7.2.1	Parameterstudie der Substratpographie	183
7.2.2	Parameterstudie der Nivellierungszeit	185
7.2.3	Parameterstudie der Schichtdicke	187
7.2.4	Parameterstudie zur Auftragsform	189
8	Zusammenfassung und Ausblick	191
9	Literaturverzeichnis	194
10	Verzeichnis betreuter Abschlussarbeiten	202

Verzeichnis verwendeter Kurzzeichen

α_2	Kontaktwinkel
α_{open}	Öffnungswinkel eines Zahnes der Substrattopographie
β_{tilt}	Neigungswinkel einer Zahnflanke der Substrattopographie
Θ	Aufbaulage SLS-Rohbauteil
Θ_{SLS}	Winkellage des Bauteils im Bauraum
Δ	Differenz
Δh_{ges}	Differenz zweier aufeinander folgender, aufaddierter Schichtdicken
$\Delta S a_n$	Glättungsfortschritt
δ	Differenz
κ^{-1}	Kapillarlänge
η	dynamische Viskosität
σ	Oberflächenspannung
σ_{fg}	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Gas
σ_{sf}	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Substrat
σ_{sg}	Grenzflächenspannung zwischen Substrat und Gas
σ_{T}	Oberflächenspannung der Tinte
ρ	Dichte der Flüssigkeit
τ	charakteristisches Zeitintervall
λ	Wellenlänge
λ_{c}	länge des Abschnitts
λ_{dom}	dominierende Wellenlänge
$\lambda_{\text{dom,S}}$	dominierende Wellenlänge der Substrattopographie
$\lambda_{\text{dom,EST}}$	dominierende Wellenlänge der Tintentopographie
$\lambda_{\text{dom,theor}}$	dominierende Wellenlänge berechnet/ aus Fitfunktion
$\lambda_{\text{dom,exp}}$	dominierende Wellenlänge aus Fast-Fourier-Transformation
a	halbe Basislänge eines Zahnes der Substrattopographie
a_0	anfängliche Amplitude nach einer Nivellierungszeit t_N gleich 0
a_t	Amplitude nach einer Nivellierungszeit t_N
A_1	Fläche 1
A_2	Fläche 2
A_3	Fläche 3
b	Länge der Messfläche senkrecht zur Zahnstruktur
B	Proportionalitätsfaktor gleich 1
b_{druck}	Druckbahnbreite
C	Konzentration
CMYK	Grundfarben Cyan, Magenta, Yellow und Kontrastfarbe Black
d	Druckpunktastand
DoD	Drop on Demand

dpi	dots per inch
dt	Zeitintervall
EST	Tintentopographie (kurz für Eigenstruktur der Tinte)
F	Triebkraft
F_G	Gravitationskraft
F_{visk}	viskose Kraft
g	Fallbeschleunigung am Ort
h	mittlere Schichtdicke
h_0	anfängliche mittlere Schichtdicke nach einer Zeit t_N gleich 0
h_{ges}	gesamte Schichtdicke nach n Druckdurchgängen
$h_{\text{ges, Spitze}}$	gesamte Schichtdicke nach n Druckdurchgängen auf der Spitze
$h_{\text{ges, Tal}}$	gesamte Schichtdicke nach n Druckdurchgängen in dem Tal
h_s	Schichtdicke eines Volumenelements in der additiven Fertigung
h_{Seg}	Segmenthöhe eines Druckpunktes
$h_{\text{Seg, x}}$	Schnittpunkt zweier Druckpunkte
h_{Spitze}	Schichtdicke auf der Spitze
h_t	mittlere Schichtdicke nach einer Nivellierungszeit t_N
h_{Tal}	Schichtdicke auf der Spitze pro Druckdurchgang
k	Wellenzahl
K-Anteil	Schwarzanteil
MF	Messfläche
MP	Messpunkt
Mr_1	Materialanteil 1
Mr_2	Materialanteil 2
MW	Mittelwert
n	Anzahl der Druckdurchgänge
NSFE	normalisierte freie Oberflächenspannung
$n_{s, \text{full}}$	Anzahl der Druckdurchgänge, ab der Tintentopographie dominiert
n_v	Anzahl der freien Volumina in einer Messfläche
PA12	Polyamid 12
p_{Hyd}	hydrostatischer Druck
p_K	kapillarer Krümmungsdruck
Q	Volumenstrom
r	Krümmungsradius
Ra	arithmetische Mittenrauheit
REM	Rasterelektronenmikroskopie
r_f	Rauheitsfaktor nach Wenzel
Rk	Kernrauheit
Rmr	Materialanteil
Rpk	reduzierte Spitzenhöhe
Rvk	reduzierte Riefentiefe

Rz	gemittelte Rauheit
Rz _n	gemittelte Rauheit der n. Schicht
Rz _{n+1}	gemittelte Rauheit der n+1. Schicht
Rz _t	gemittelte Rauheit nach Nivellierungszeit t _N
Sa	arithmetische Mittenrauheit
Sa ₀	Ausgangsrauheit Sa der Substrattopographie
Sa _{EST}	arithmetische Mittenrauheit der Tintentopographie
Sa _{EST0}	Ausgangsrauheit Sa der Tintentopographie
Sa _{ESTt}	arithmetische Mittenrauheit der Tintentopographie zu einem Zeitpunkt t
Sa _{EST,ms}	arithmetische Mittenrauheit der Tintentopographie nach kurzer t _N
Sa _{EST,s}	arithmetische Mittenrauheit der Tintentopographie nach langer t _N
Sa _n	arithmetische Mittenrauheit nach n Druckdurchgängen
Sk	Kernrauheit
SLS	selektive Lasersinterverfahren
Spk	reduzierte Spitzenhöhe
Svk	reduzierte Riefentiefe
t	Zeit
t ₁	Prozesszeit des selektiven Lasersinterns eines Bauteils
t ₂	Prozesszeit des Transfers
t _{3,1}	Prozesszeit des mechanischen Glättens
t _{3,2}	Prozesszeit des additiven Glättens mittels Inkjet
t ₄	Prozesszeit des Transfers
t _{5,1}	Prozesszeit Lackierung
t _{5,2}	Prozesszeit Bedruckung
t _N	Nivellierungszeit der Tinte
UV	Ultraviolett
v	mittlere Fließgeschwindigkeit
V _{frei,MF}	freie Volumen einer definierten Messfläche in mm ³
V _{Tinte}	Tintenvolumen
Wsls	undefinierte Substrattopographie nach dem Lasersintern
W100	definierte Substrattopographie mit α _{open} von 100°
W120	definierte Substrattopographie mit α _{open} von 120°
W135	definierte Substrattopographie mit α _{open} von 135°
W _{CG}	Substrattopographie chemisch geglättet
W _{IG}	Substrattopographie Inkjet geglättet
W _{MG}	Substrattopographie mechanisch geglättet
x	Länge
z	Profilhöhe
z ₁	Profilhöhe an erster Schnittstelle
z _{max}	maximale Profilhöhe

1 Einführung

Neue Mobilitätskonzepte in der Automobilindustrie, die sich mit Carsharing, Mitfahrgelegenheit und vernetzter Mobilität auseinandersetzen, nehmen in den urbanen und in Großstädten konzentrierten Wohnräumen einen zunehmend hohen Stellenwert in der Bevölkerung ein. (Schade W, Kühn A., 2012) Besonders in diesen Zeiten ist es das Streben der Industrie, den Kunden stets das Gefühl der individuellen Nutzung des Automobils zu vermitteln. Dieses Gefühl kann durch kundenspezifische Wünsche im Interieur, wie zum Beispiel im geometrischen Bauteildesign (Daimler AG, 2016); (BMW Group, 2018), oder der individuellen visuellen und haptischen Wirkung realisiert und wirtschaftlich umgesetzt werden. Die Realisierung fordert jedoch flexible Fertigungs- und Veredelungsverfahren. Ebenso müssen die Prozesse auf diese neuen Umstände angepasst werden.

Die Individualisierung des visuellen und haptischen Eindrucks von Bauteiloberflächen wird nach heutigem Stand durch unterschiedlichste Verfahren umgesetzt. Zugrunde liegt das Bedrucken oder Prägen von Folien und das anschließende Aufbringen derselben auf das Bauteil. Dieser mehrstufige Herstellungsprozess einer individualisierten Bauteiloberfläche ist aufwendig wie auch kostenintensiv. Durch neu entwickelte Mehrachsdrucker wird das direkte Bedrucken von Bauteilen ermöglicht. Das hat zur Folge, dass der Prozessaufwand reduziert und konventionell gefertigte Bauteile in hohem Grad individualisiert werden können. (Hartung M., 2017)

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen individualisierte geometrische Bauteildesigns einzelner Komponenten beispielsweise im Interieur. Kleine Veränderungen der Geometrie von Radien oder Wölbungen sind durch die computergestützte Konstruktion variabel anpassbar, solange die Sicherheitsrelevanz nicht beeinträchtigt wird. Zudem können schwer zugängliche Passagen des Bauteils, die mittels konventioneller Verfahren nur sehr aufwendig hergestellt werden können, durch den schichtweisen Aufbau schnell erzeugt werden. Ein weiterer Vorteil der additiven Fertigung ist die Integration von mechanischen Funktionen in das Bauteil ohne einen zusätzlichen Montageprozess, wie es die konventionellen Verfahren benötigen. (Gebhardt, 2013) Das selektive Lasersinterverfahren (kurz: SLS) ist das aktuell am häufigsten eingesetzte additive Fertigungsverfahren. Eingesetzt wird bei dieser Technologie zumeist Polyamid, da es die benötigten mechanischen Eigenschaften besitzt. Dieses Fertigungsverfahren weist insbesondere Defizite in der visuellen und haptischen Wirkung der fertigen Bauteile auf. So entspricht die Farbe des Bauteils nach dem Lasersintern der Basisfarbe des Ausgangspulvers, welche zumeist weiß ist. Die Bauteiloberfläche besitzt, aufgrund der anhaftenden Pulverkörner und des typischen Schichtaufbaus zusätzlich eine charakteristische Substratopographie. Die eingeschränkte Farbvielfalt und die unerwünscht strukturierte Oberflächenqualität limitiert den Einsatz der Bauteile auf den Nicht-Sichtbereich der Kunden im Fahrzeuginterieur. (Daimler AG, 2016) Der Einsatz der Bauteile im direkten

Sichtbereich erfordert einen hohen Aufwand bezüglich der Oberflächenaufbereitung, da sich jedes Bauteil durch die Individualisierung der Bauteilgeometrie unterscheidet. Möglichkeiten für die Aufbereitung und Veredelung, um Bauteile im Sichtbereich einsetzen zu können, beruhen aktuell auf dem manuellen Lackier- und teilweise dem Handkaschierprozess.

Das Lasersintern ermöglicht die Designfreiheit eines Bauteils mit Einschränkung in der Oberflächenqualität. Die Inkjet-Technologie erweitert das Spektrum der Individualisierung durch die persönliche visuelle Gestaltung des Oberflächendesigns. Die Kombination dieser beiden Technologien erweitert die Möglichkeiten der Personalisierung und soll in dieser Arbeit näher betrachtet werden.

2 Grundlagen

Die Kombination der beiden Technologien setzt voraus, dass der aktuelle Gesamtfertigungsprozess, bestehend aus dem Lasersintern und der anschließenden Lackierung von lasergesinterten Bauteilen, verstanden wird. Unter Berücksichtigung dieses Gesamtfertigungsprozesses kann ein Konzept für einen Soll-Prozess, welcher aus dem Lasersintern und dem anschließenden Bedrucken besteht, für die Kombination der Lasersinter-Technologie und der Inkjet-Technologie erarbeitet werden. Die Umsetzbarkeit dieses Konzepts für den Soll-Prozess setzt das Verständnis der Verfahrensgrundlage des selektiven Lasersinterns, der Verfahrensgrundlage der Inkjet-Technologie und der Fluidodynamik des mit Inkjet gedruckten Films auf der Oberfläche des lasergesinterten Bauteils voraus. Diese werden in den folgenden Kapiteln erarbeitet.

2.1 Gesamtfertigungsprozess von lasergesinterten Bauteilen

Eine Möglichkeit des Lackaufbaus besteht aus der Grund-, Zwischen- und Decklacksschicht. Der Grundlack setzt sich zusammen aus haftvermittelnden oder auch festkörperreichen Grundierungen, die Oberflächenfehler egalisieren. Zusätzlich werden Füller eingesetzt, um Defekte auszubessern. Zwischenlacke übernehmen meist farb- und effektgebende Funktionen. Decklacke bilden als letzte Schicht des Lackaufbaus die Grenzfläche zur Umgebung. (Lake, 2017) Neben der chemischen und physikalischen Beständigkeit zeichnen sich Decklacke, wie beispielsweise Klarlacke, durch visuelle und haptische Eigenschaften aus. Die Lackierung reduziert die Rauheit der Oberfläche des SLS-Rohbauteils, jedoch können die intensiv ausgeprägten Linien, die durch die aufeinandergesetzten Volumenelemente in der Baufortschrittsrichtung entstanden sind (Blattmeier, 2012), durch eine einfache Lackierung nicht ausgebessert werden (Kaddar, 2010). Die Oberflächenveredelung muss um einen Aufbereitungsschritt erweitert werden, in dem der chemische bzw. mechanische Abtrag der ausgeprägten Struktur vor der Oberflächenveredelung stattfindet. Im ersten Schritt besteht der Veredelungsprozess eines lasergesinterten SLS-Rohbauteils aus dem mechanischen Abtrag unerwünschter Strukturelemente der SLS-Oberfläche, welche durch manuelles Schleifen entfernt werden. Hierbei werden die ausgeprägten Strukturen herausgearbeitet. Im Anschluss folgen die Grundierung und der Füller, die zusätzlich den Untergrund ausgleichen. Danach wird der eigentliche Basislack appliziert, der für die Farbgestaltung zuständig ist. Der Klarlack fungiert als Schutzschicht für den Basislack und wird als letzte Schicht aufgebracht, Abb. 2-1.

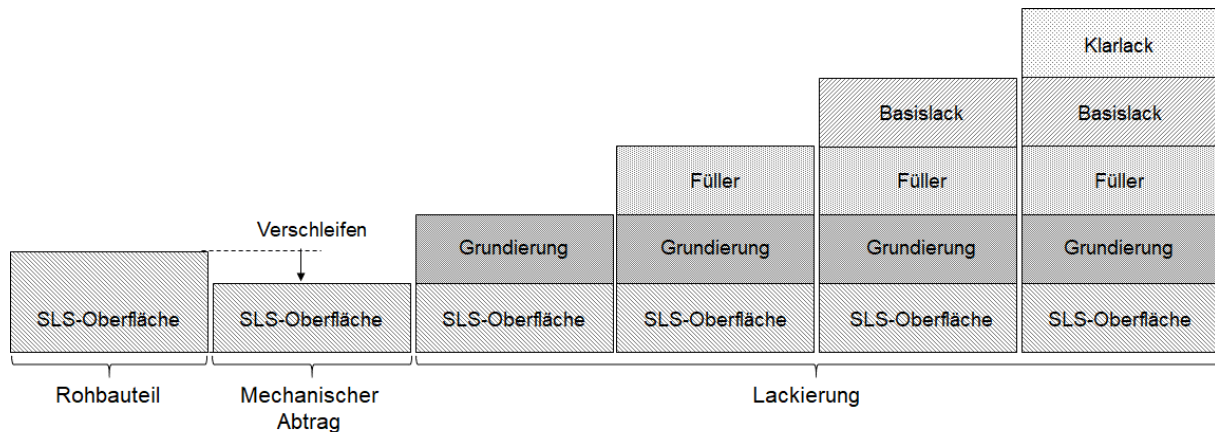


Abbildung 2-1: Schematischer Lackierprozess eines lasergesinterten Bauteils auf Basis der Handlackierung. Fertigung des Rohbauteils mit SLS-Oberfläche, mechanischer Abtrag der rauen Oberfläche und Lackierung des oberflächenaufbereiteten Rohbauteils.

Der Lackierprozess zur Oberflächenveredelung für individuelle Bauteile hat den Nachteil, dass er zeitaufwendig ist und durch subjektive Bewertung des Werkers qualifiziert werden muss. Ebenso unterscheiden sich die einzelnen Schritte des Fertigungsprozesses in ihrer Handhabung. Die Individualisierung ist bedarfsabhängig, wodurch kein kontinuierlicher Bestelleingang gewährleistet ist. Durch die geringe Stückzahl wird im Ist-Prozess im Allgemeinen auf eine automatisierte Handhabung verzichtet. Stattdessen werden die einzelnen Fertigungsschritte manuell durchgeführt, Abb. 2-2.

Der, in der Handhabung und der Prozesszeit sensible, Gesamtfertigungsprozess, der den aktuellen Ist-Prozess darstellt, soll durch einen robusten und flexiblen Soll-Prozess ersetzt werden. Die Grundlage bleibt bei diesem Prozess bestehen. Die Bauteile werden mit dem selektiven Lasersinterverfahren (SLS) aufgebaut. Die Fertigung des SLS-Rohbauteils des Ist- wie auch des Soll-Prozesses inkludiert den Aufbau, das Entpacken und das Reinigen mittels Strahlen des Bauteils, Abb. 2-2. Die Prozesszeit t_1 dieses Verfahrensschritts variiert unter anderem nach Bauraumauslastung und der Schichtstärke, mit der das Bauteil generiert wird. Nach dem Aufbau wird das Bauteil aus dem Pulverbett entpackt und das noch anhaftende, lose Pulver durch Glaskugelstrahlen manuell entfernt. Im Anschluss wird das Bauteil mit Druckluft gereinigt. Nachdem das Bauteil gereinigt wurde, folgt innerhalb der Prozesszeit t_2 der manuelle Transfer des Bauteils von einem Werker zur Oberflächenaufbereitung. Dort findet der chemische oder mechanische Abtrag statt. Die Rauheit der Oberfläche wird durch den Abtrag reduziert und damit die Oberfläche für die nachgelagerte Oberflächenveredelung aufbereitet. Die Wahl der automatisierten oder manuellen Handhabung, wie auch die Prozesszeit $t_{3.1}$ für diesen Verfahrensschritt, hängt von der Bauteilgröße, -komplexität und -qualität ab. Nachdem die Oberfläche im Ist-Prozess aufbereitet wurde, wird diese manuell innerhalb der Prozesszeit t_4 zur Lackierung von einem Werker transportiert. Im Anschluss folgt die aufwendige Lackierung innerhalb der Prozesszeit $t_{5.1}$, die aufgrund der flexiblen

Bauteilgeometrien und den zusätzlich integrierten Schleifprozessen nicht automatisiert abläuft, Abb.2-2. Das dekorative Bauteildesign, das für die visuelle Wirkung verantwortlich ist, erfordert einen komplexen Schichtaufbau. Sind individuelle Muster auf der Bauteiloberfläche erwünscht, muss der Lackiervorgang um das Abkleben und selektive Handlackieren erweitert werden. Je nach Komplexität des gewünschten Musters werden zusätzliche Schritte notwendig. Die Prozesszeiten wie auch die Handhabung des Ist-Prozesses sind Faktoren, die abhängig von dem Werker sind. Die Verkürzung der Prozesszeit des Ist-Prozesses auf die Prozesszeit des Soll-Prozesses kann durch das Integrieren der Oberflächenaufbereitung in die Oberflächenveredelung erreicht werden. Dies bedeutet, dass der additive Auftrag zum Glätten der Oberfläche und die Oberflächenveredelung aus dem Inkjet-Druck erfolgen muss. Während die Prozesszeit t_1 der Fertigung des SLS-Rohbauteils und der manuelle Transfer zu den nachgelagerten Schritten unverändert zum Ist-Prozess bleiben, kann so die Transferzeit t_4 aus dem Ist-Prozess eingespart und die gesamte Prozesszeit um $-\delta t$ im Vergleich zum Ist-Prozess verkürzt werden. Die Prozesszeiten $t_{3,2}$ des additiven Auftrags und $t_{5,2}$ der Oberflächenveredelung sind von der zu bedruckenden Fläche, der Bahnführung entlang des Bauteils und der Anzahl an Überdruckungen abhängig. Der Vorteil zum Ist-Prozess liegt in der automatisierten Handhabung, da das Bauteil durch den Drucker und nicht durch den Werker bearbeitet wird. Zusammenfassend bedeutet dies, dass der Soll-Prozess die Bauteilgenerierung des SLS-Rohbauteils mittels selektiven Lasersinterns, die Oberflächenaufbereitung mittels additiven Auftrags und die individuelle Oberflächenveredelung mittels des Inkjet-Drucks beinhaltet, Abb.2-2. Die Inkjet-Technologie ermöglicht, direkt nach dem Fertigen des SLS-Rohbauteils, eine haptisch ansprechende Oberfläche zu generieren und unmittelbar danach die visuelle Wirkung des Bauteils durch die Oberflächenveredelung zu vervollständigen.

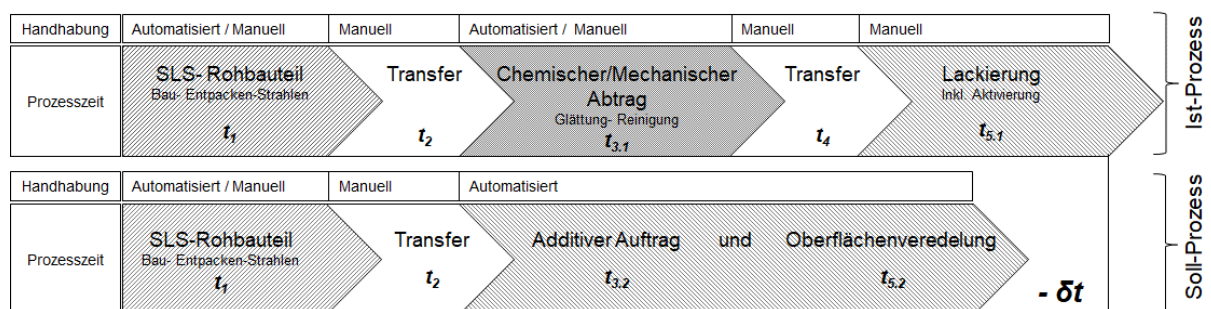


Abbildung 2-2: Schematischer Ablauf eines Fertigungsprozesses von SLS-Rohbauteilen für den Einsatz in Serie nach dem Ist-Prozess und dem Soll-Prozess. Neben der Handhabung spielt die Prozesszeit für einen effizienten Fertigungsprozess eine Rolle.

Die Kombination der individualisierten visuellen und haptischen Wirkung eines Bauteils aus dem Inkjet-Verfahren mit dem individualisierten, geometrischen Bauteildesign aus der additiven Fertigung ermöglicht Designern wie auch Kunden eine hohe Gestaltungsfreiheit.

2.2 Verfahrensprinzip des selektiven Lasersinterns

Die additive Fertigung basiert auf dem Grundprinzip, dass unterschiedlich konturierte, zweidimensionale Schichten aneinandergefügt werden, die im Gesamtbild ein dreidimensionales Bauteil bilden.

Das selektive Lasersintern ist ein additives Fertigungsverfahren, dessen Ausgangsmaterial die Form von feinkörnigem Pulver auf Polymerbasis besitzt. Zumeist handelt es sich um Polyamid 12 (kurz: PA12), das aufgrund der Korngrößenverteilung und -form eine gute Fließeigenschaft und eine hohe Schüttdichte besitzt. (EOS GmbH, 2018) Für den Fertigungsprozess sind diese Eigenschaften von Vorteil, da zum einen die gute Fließeigenschaft eine homogene Pulververteilung des Pulverbetts in der Bauebene ermöglicht, zum anderen die Schüttdichte und die Korngrößenverteilung die mechanischen und visuellen Bauteileigenschaften verbessert.

Aus den digitalen Bauteildaten werden Schichtdaten abgeleitet. Diese Schichtdaten besitzen orts aufgelöste Informationen, zu denen der Spiegel den Laserstrahl über das zuvor aus dem Pulvervorratsbehälter aufgerakelte Pulverbett im Bauraum lenkt. Der Laserstrahl erwärmt das Pulver an den entsprechenden Stellen der Pulverbettsoberfläche thermisch. Dadurch werden die Pulverkörner an- bzw. aufgeschmolzen und das Volumenelement des Rohbauteils, das sich aus den Schichtdaten der Fläche und der Schichtdicke h_s zusammensetzt, entsteht. Die thermische Erwärmung erfolgt lediglich an den angesteuerten Bereichen, wodurch das umliegende Pulver im körnigen Zustand bleibt. Der flüssige Film kühlt wieder ab und das erste Volumenelement mit definierter Schichtdicke h_s erstarrt. Die Bauplattform wird um eine definierter Schichtdicke h_s abgesenkt und die nächste Pulverschicht aus dem Pulvervorratsbehälter wird auf die zugrundeliegende Schicht mit der Rakel aufgerakelt. Überschüssiges Pulver wird im Pulverauffangbehälter gesammelt. Der Laser muss die neu aufgerakelte Pulverschicht zum einen durchdringen, sodass in der Grenzschicht zwischen der bereits erstarrten Schicht und der neuen Pulverschicht eine Verbindung in der Grenzschicht durch ein Anschmelzen der ersten Schicht entsteht. Zum anderen soll das Pulver der neuen Pulverschicht genügend Laserstrahlung absorbieren, sodass die Kontur der nächsten Schicht entstehen kann. Aus den aneinander gefügten Schichten der Schichtdaten ist das Rohbauteil in seiner komplexen Form generiert, Abb. 2-3. (Gebhardt, 2013)

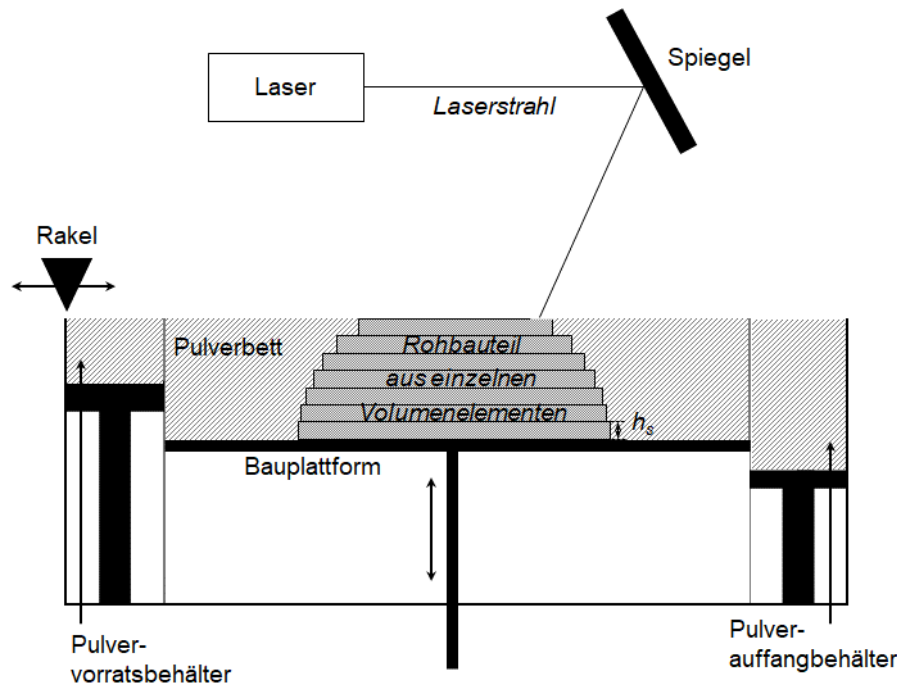


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung des SLS-Fertigungsprozesses eines Rohbauteils aus einzelnen Volumenelementen mit der Schichtdicke h_s . Die Bauplattform wird abgesenkt, Frispulver aus dem Pulvervorratsbehälter auf das Pulverbett ausgerakelt und das Volumenelement mittels Laserstrahl aufgeschmolzen, sodass das Rohbauteil entsteht.

Die Konturierung der einzelnen Schichten ist in x-y-Richtung, der sogenannten Bauebene, sehr präzise, da kleine Veränderungen in der Kontur lediglich abhängig von der Laserführung sind. Die Kontur in z-Richtung, der sogenannten Baufortschrittsrichtung, wird mit einer definierten Schichtdicke h_s gebildet. Die Kontur in Baufortschrittsrichtung kann innerhalb einer einzelnen Schicht nicht verändert werden, wodurch die Präzision der Kontur eines Bauteils in z-Richtung abnimmt. Folgt auf eine Kontur des ersten Volumenelements eine kleinere oder größere Kontur des nächsten Volumenelements, entsteht somit aufgrund der Volumendifferenz ein stufiges Gebilde, dass die visuelle Wirkung der Oberflächenqualität verschlechtert. (Breuninger et al., 2013); (Gebhardt, 2013) Neben dem stufigen Gebilde besitzt die Bauteiloberfläche eine mikroskopische Rauheit, die aus einzelnen, stochastisch verteilten Strukturelementen gebildet wird. Diese Strukturelemente bestehen aus einzeln anhaftenden Pulverkörnern, die an den aufgeschmolzenen Volumenelementen anhaften bleiben. Das stufige Gebilde, sowie die stochastisch verteilten Strukturelemente auf dem Bauteil bilden maßgeblich die Substrattopographie aus.

2.3 Verfahrensprinzip der Inkjet-Technologie

Die Anwendung der Inkjet-Technologie beinhaltet die Druckvorstufe, in der die Druckvorlage für den Inkjet-Druck vorbereitet wird und dem anschließenden Inkjet-Druck an sich. Auf diese beiden Teilaspekte der Verfahrensgrundlage der Inkjet-Technologie wird in den nächsten Unterkapiteln näher eingegangen.

2.3.1 Druckvorstufe

Die Druckvorstufe beinhaltet die Tätigkeiten, die zur Erstellung einer Druckvorlage benötigt werden, sodass im Anschluss der eigentliche Druckvorgang durchgeführt werden kann. Eine Tätigkeit innerhalb der Druckvorstufe ist die Bildbearbeitung, mit der die Grafiken in die, für den Inkjet-Drucker verwendbaren Farben, transferiert werden.

Die Inkjet-Technologie ist ein Digitaldruckverfahren, das zumeist aus den Grundfarben Cyan, Magenta, Yellow und Black (CMYK) die unterschiedlichen Farben einer Bildinformation der Originalabbildung als Druckbild auf ein Drucksubstrat farbtreu wiedergeben kann. (Kipphan, 2000)

Die Originalabbildung besteht aus einem breitgefächerten Farbspektrum, das überwiegend durch die vier Grundfarben Cyan (C), Magenta (M), Yellow (Y) und der Kontrastfarbe Black (K) abgedeckt werden muss. Hierfür wird die Originalabbildung in der Druckvorstufe mit Hilfe der Software aufbereitet. Die Originalabbildung wird zunächst in seine vier Grundfarben zerlegt und anschließend die daraus entstandenen vier Halbtonbilder in Raster unterteilt. Der Halbton kann durch die Fläche des Druckpunkts in diesem Raster variiert werden, da sich der visuelle Farbeindruck des Halbtons durch eine additive Mischung des Druckpunktes mit der unbedruckten Fläche im Raster ergibt, Abb. 2-4.

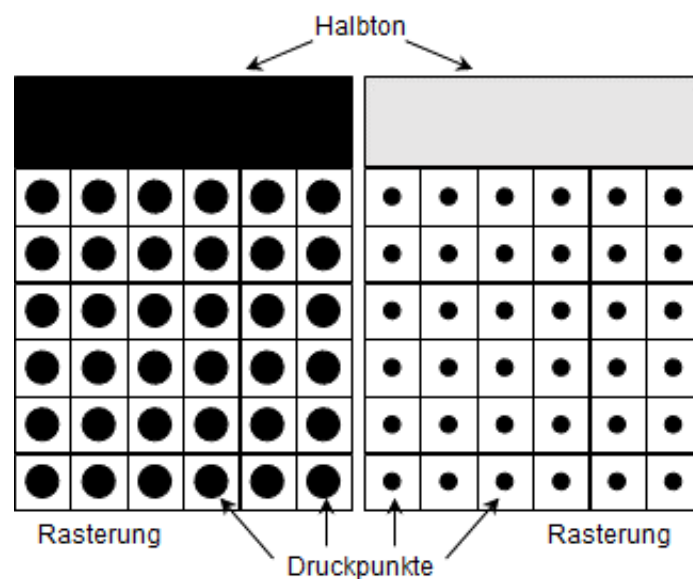


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Halbtöne durch unterschiedlich große Druckpunkte im Raster.

Wird in einem Layout beispielsweise der Schwarzanteil (K-Anteil) von 0 % bis 100 % variiert, dann wird dies Graustufenverlauf genannt. Eine rein schwarze Fläche entspricht einem Schwarzanteil der Kontrastfarbe (K-Anteil) von 100 %. Für diesen Halbton wird ein größeres Tintenvolumen der zu druckenden Druckpunkte der Grundfarbe K benötigt. Je heller der Grauton wird, desto geringer wird das benötigte Volumen und der Druckpunkt wird kleiner,

Abb. 2-5. Der Druckpunktabstand d , der sich auf die Einstellung dpi (dots per inch) bezieht, bleibt bei den unterschiedlichen Volumina der Druckpunkte konstant.

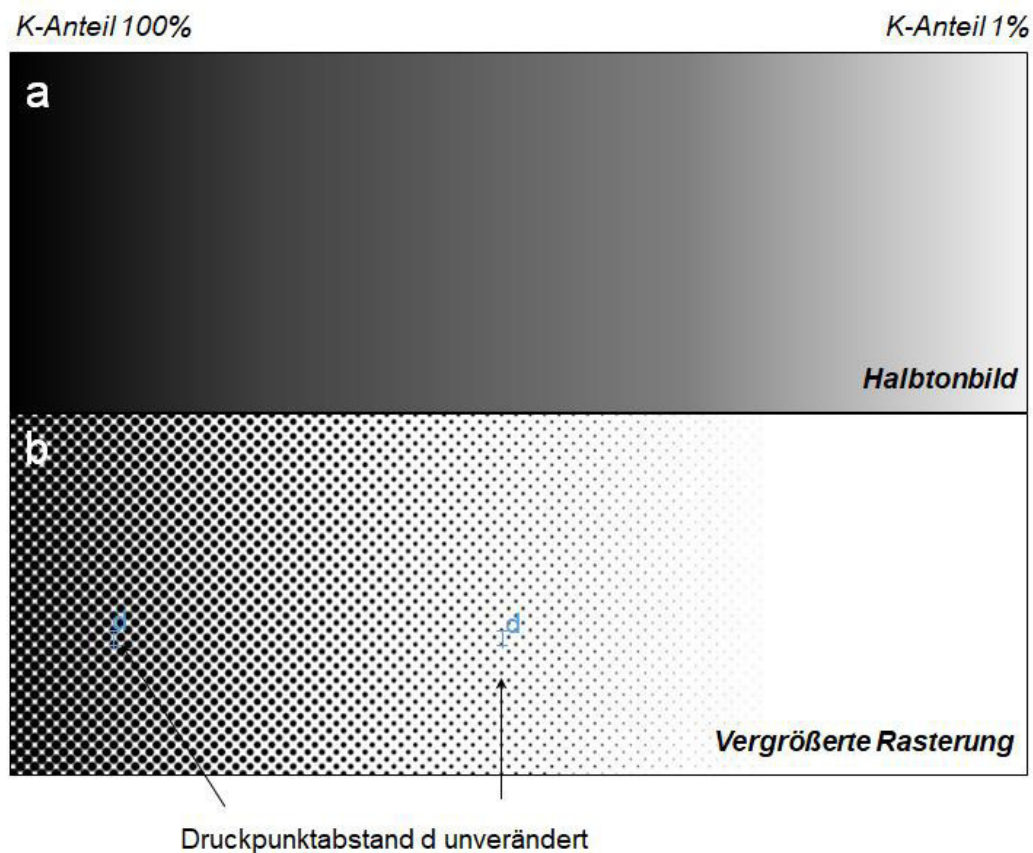


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung a) des Farbverlaufs eines Halbtonbildes der Kontrastfarbe K von einem K-Anteil von 100 % bis zu einem K-Anteil von 1 % und b) der vergrößerten Rasterung einzelner Druckpunkte mit unterschiedlichen Volumen bei gleichbleibendem Druckpunktabstand. Prozessbedingt sind nicht alle kleinen Druckpunkte zu erkennen.

Die auf diese Weise gerasterten Halbtonbilder der vier Grundfarben werden unter einem Rasterwinkel verdreht und aufeinander gedruckt, sodass ein homogenes Bild erzeugt wird, Abb. 2-6. (Bühler et al., 2018) Die Verdrehung in einem definierten Rasterwinkel birgt die Gefahr unerwünschter visueller Effekte, wie zum Beispiel den Moiré-Effekt, bei dem die Überlagerung von kleineren Rastern ein Muster aus unerwünschten Interferenzen ergibt (Dreher, 2018). Aus diesem Grund werden die Rasterwinkel nach ISO 12647 (ISO Internationale Organisation für Normung, 2013) herangezogen. Das überlagerte Druckbild zeigt die einzelnen Farbnuancen der Originalabbildung auf einer großen Fläche, ohne dass einzelne Druckpunkte die Fläche dominieren.

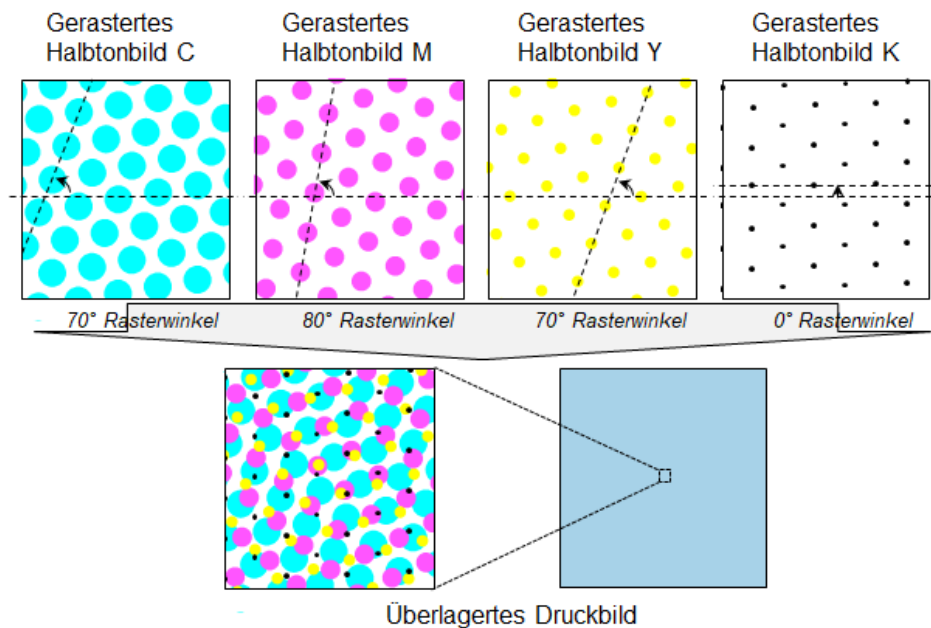


Abbildung 2-6: Erzeugung der Druckvorlage aus einem aus den Halbtonbildern überlagerten Druckbild. Die gerasterten Halbtonbilder werden mit Hilfe der Software hier in einem fiktiven Rasterwinkel verdreht und aufeinandergelegt um unerwünschte Effekte (z.B. Moiré-Effekt) zu vermeiden. [nach (Hartmann & Schneider, 2008)]

Diese softwareunterstützte Rasterung und die Rasterwinkelung in der Druckvorstufe ermöglicht das Drucken der Originalabbildung mittels der Inkjet-Technologie.

2.3.2 Drucktechnologie

Die Inkjet-Technologie kann nach der Art der Tropfenerzeugung, wie beispielsweise dem Drop-on-Demand und dem Continuous Inkjet, und nach den Impulsgebern zur Tropfenerzeugung, wie beispielsweise der mechanischen Tropfenerzeugung durch einen Piezo oder der thermischen Druckpunkterzeugung, unterteilt werden, Abb. 2-7. (Kipphan, 2000)

Der Continuous Inkjet erzeugt während des Betriebs kontinuierlich Tropfen. Die Druckgrafik beinhaltet die Information, welche Tropfen für das Druckbild tatsächlich benötigt werden. Nicht benötigte Tropfen werden elektrisch geladen und durch ein elektrisches Feld abgelenkt. Die aufgeladenen Tropfen $+q$ werden in den Farbbehälter zurückgeführt, wodurch die Druckpunkte gesteuert auf das Drucksubstrat aufgebracht werden, Abb. 2-7. (Kipphan, 2000)

Weiter verbreitet ist das Drop-on-Demand-Verfahren (kurz: DoD), das Tropfen erst bei Bedarf durch einen Impulsgeber an der Düse erzeugt. Die bekanntesten Impulsgeber sind, neben den weniger verbreiteten akustischen und elektrostatischen, die thermischen und die mechanischen Impulsgeber. Die Verfahren, die mit dem thermischen Impulsgeber arbeiten, sind Thermal Inkjet oder auch Bubble-Jet genannt. Im Ruhezustand tritt kein Tropfen aus der Düse aus. Bei Bedarf wird die Tinte in der Düsenkammer durch den Wärmeimpuls einer externen Wärmequelle um die Temperatur $+\Delta\vartheta$ erhitzt. Dieser Wärmeimpuls entspricht einem Signal aus der „Waveform“, die das thermische Element am Druckkopf ansteuert. Der innere

Druck steigt und drückt ein entsprechendes Tintenvolumen aus der Düse, Abb. 2- 7. (Kipphan, 2000); (Zapka, 2018) Die Verfahren, die mit dem mechanischen Impulsgeber arbeiten, sind piezoelektrische Verfahren. Diese zeichnen sich durch die Funktion mittels mechanischer Kontraktion der Düsenkammer aus. Im Ruhezustand tritt kein Tropfen aus der Düse aus, da in der Düsenkammer zunächst Unterdruck anliegt. Mit Hilfe einer Software wird das benötigte Tintenvolumen der einzelnen Farbe für die Druckgrafik berechnet und in ein Signal umgewandelt. Dieses Signal entspricht ebenfalls einer „Waveform“, die von dem Hersteller auf die verwendete Tinte ausgelegt wurde. Die Signale sind Impulsgeber für die Piezokeramik, die bei angelegter Spannung $+U$ die Düsenkammer kontrahiert. Es verändert sich das innere Volumen und der damit verbundene innere Druck steigt an. Der entstandene innere Druck gibt zum Ausgleich die Tinte in definierter Menge in Form eines Tröpfchens ab, Abb. 2-7. Der Vorteil des piezoelektrischen Verfahrens liegt in der hohen Frequenz, mit der die Tropfen ausgegeben werden können. (Wijshoff, 2010)

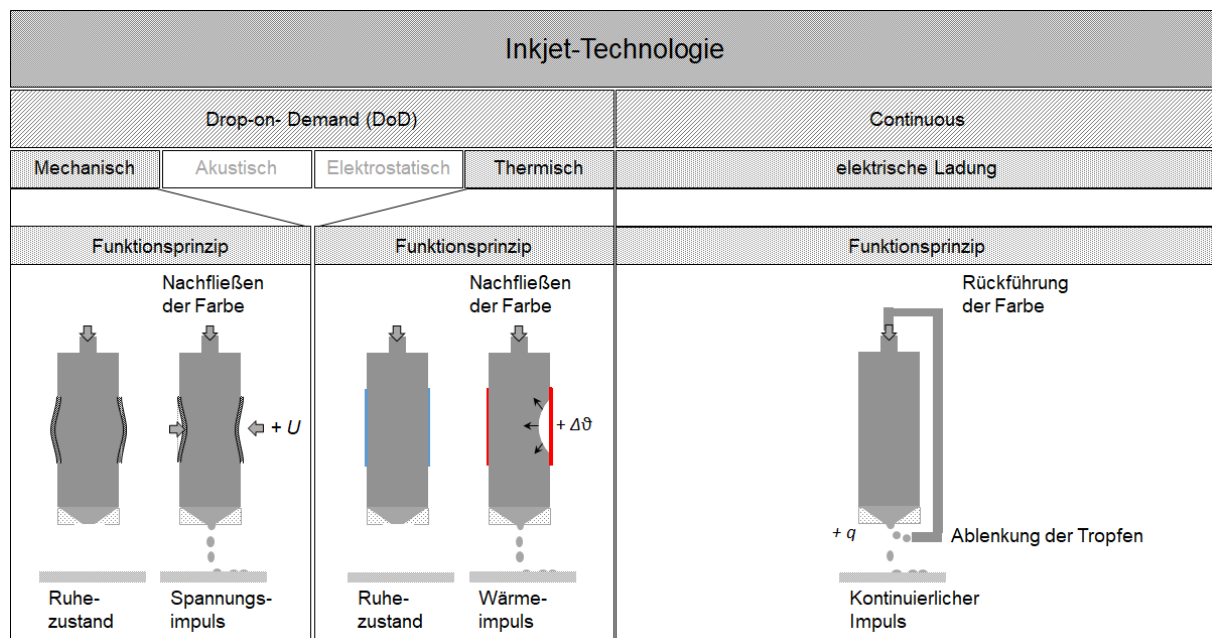


Abbildung 2-7: Einteilung der Inkjet-Technologie nach den Verfahrensgrundlagen Drop-on-Demand und Continuous, sowie deren Funktionsprinzipien mit der Fokussierung des Drop-on-Demand Verfahrens auf die am häufigsten eingesetzten Impulsgeber Spannung (Piezo) und Wärme (thermisch). [nach (Kipphan, 2000)]

Ein Replikat der Druckvorlage wird mit einer eingestellten Auflösung des Druckers hergestellt. Diese Auflösung gibt die Anzahl der Druckpunkte vor, die nach dem vollständigen Inkjet-Druck vorliegt. Wird mit einer Auflösung von 600 dpi gedruckt, besitzt das Druckbild nach vollendetem Druck 600 Druckpunkte auf einer Strecke von einem Zoll. Um ein gedrucktes Replikat der Druckvorlage zu erhalten, müssen die Druckpunkte separiert vorliegen. Im nassen Zustand neigen die halbkugelförmigen Druckpunkte zum Zusammenfließen. Dieses wird Koaleszenz genannt. Die Koaleszenz von zwei gleichfarbigen Druckpunkten wirkt sich nicht auf die Farbgebung im Druckbild aus, lediglich im Randbereich wird das Verlaufen der

Druckpunkte, englisch Bleeding, ersichtlich. Koalieren hingegen zwei farblich unterschiedliche Druckpunkte, wird zusätzlich die Farbgebung im Druckbild durch das Vermischen der beiden Druckpunkte verändert. Diese Farbvermischung wirkt sich negativ auf die Druckbildqualität aus. Der Farbvermischung kann durch ausreichend weites Separieren der Druckpunkte entgegengesteuert werden. Je weniger Druckpunkte innerhalb einer Überfahrt des Druckkopfes, englisch Pass, gedruckt werden, desto größer ist der Abstand der einzelnen Druckpunkte zueinander. Durch das direkte Trocknen der Druckpunkte nach dem Pass, koalieren diese nicht. (Hoath, 2016)

Die Anzahl der Pass untergliedert die Düsenreihen des Druckkopfes in gleichgroße Abschnitte. Jeder Abschnitt besitzt eine entsprechende Breite, Abb.2-8.

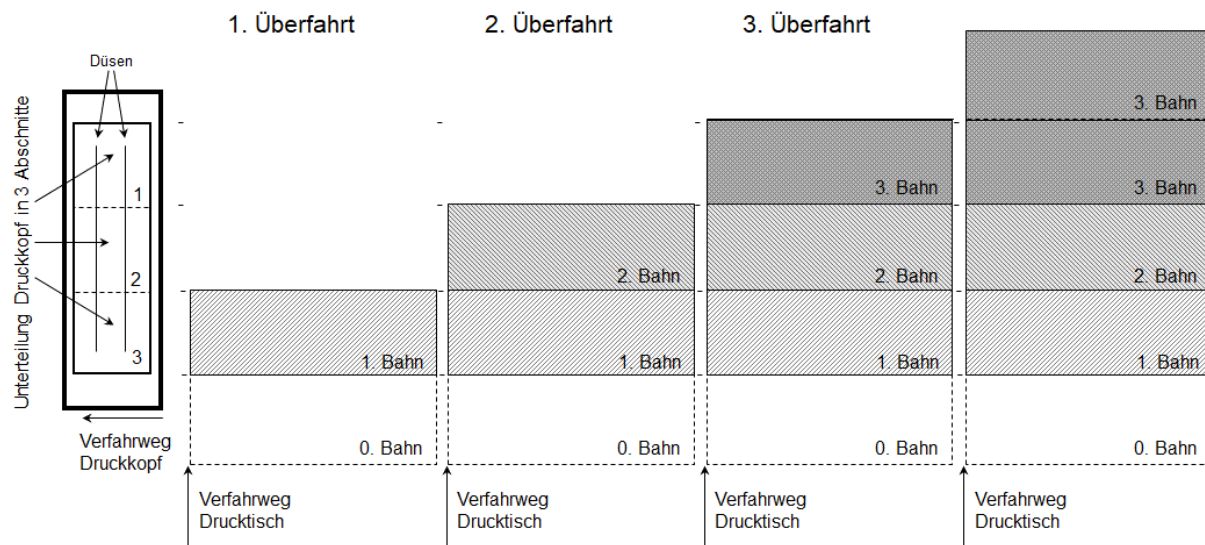


Abbildung 2-8: Schematischer Aufbau eines Druckbildes. Die Druckbahnbreite entspricht den Verfahrweg des Druckkopfes, der entsprechend der Passanzahl in gleichgroße Bereiche untergliedert ist. Das Druckbild wird durch mehrfache Überfahrt des Druckkopfes vollständig aufgebaut. [nach (Ohnishi et al., 2009)]

Entsprechend dieser Breite überfährt der erste Abschnitt des Druckkopfes das Substrat und bedruckt dieses. Es entsteht eine Bahn mit einer entsprechenden Anzahl an Druckpunkten. Nach erfolgtem Druck fährt der Drucktisch das Substrat um die Breite eines Abschnittes heraus und die zweite Überfahrt erfolgt. Die zuerst gedruckte Bahn wird mit dem zweiten Abschnitt des Druckkopfes bedruckt und es wird eine neue Bahn aus dem ersten Abschnitt generiert. Der Tisch fährt mit dem Substrat erneut um die Breite des Abschnitts heraus. Die zuerst gedruckte Bahn wird mit dem dritten Abschnitt des Druckkopfes zum dritten Mal überdruckt. Die zweite Bahn mit dem zweiten Abschnitt des Druckkopfes zum zweiten Mal und die erste Bahn mit dem ersten Abschnitt des Druckkopfes zum ersten Mal gedruckt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis jede Bahn mit allen Abschnitten des Druckkopfes überfahren und das Bild vollständig gedruckt wurde. Da sich die Bahn durch das Bedrucken aus mehreren Abschnitten aufbaut, werden nicht alle Druckpunkte in der ersten Überfahrt gedruckt. Vereinfacht wird die Auflösung innerhalb der Anzahl an Pass generiert. Je höher die Passzahl,

desto weniger Druckpunkte werden innerhalb einer Überfahrt gedruckt. Je weniger Druckpunkte in einer Überfahrt gedruckt werden, desto höher kann der Abstand zwischen den in einer Bahn aufgetragenen Druckpunkten sein. So kann durch die Passzahl die Farbvermischung eingedämmt und die Druckbildqualität gewährleistet werden. (Ohnishi et al., 2009)

Nachdem der Druckpunkt auf das Substrat aufgebracht wurde, muss dieser zügig trocknen, sodass das weitere Fließen der Tinte unterbunden wird. Die Art der Trocknung ist abhängig von der verwendeten Tintenbasis. Neben den wasserbasierenden und den lösemittelbasierenden Tinten, die durch das Verdampfen des Lösemittels trocknen, härtet die UV-vernetzende Tinte durch die Vernetzung der Moleküle nach Initiieren mit UV-Strahlung, aus. (Magdassi, 2010)

2.4 Fluidodynamik dünner Filme

Das unkontrollierte Spreiten einzelner Druckpunkte ist beim Drucken in der graphischen Gestaltung unerwünscht, da dieses zu unerwünschter Farbvermischung führen kann. Bei einem monocoloren Tintenfilm, der die raue Topographie einglätten soll, ist dieses hingegen erwünscht. Nur durch einen homogenen flächigen Film aus Tinte, der durch gespreitete Druckpunkte erzeugt wird, kann die Rauheit reduziert werden. Um einen dünnen, gleichmäßigen Film zu erzeugen, ist es grundlegend wichtig, dass das Substrat vollständig von der Flüssigkeit benetzt wird. Die Benetzbarkeit eines Substrats mit einer Flüssigkeit ist abhängig von drei Grenzflächenspannungen, die aus drei Grenzflächenkonstellationen vorliegen: der Grenzflächenspannung σ_{sg} aus der Grenzfläche des Substrats zum umliegenden Gas, der Grenzflächenspannung σ_{sf} aus der Grenzfläche zwischen Substrat und Flüssigkeit und der Grenzflächenspannung σ_{fg} aus der Grenzfläche der Flüssigkeit zum umliegenden Gas, die miteinander durch den Kontaktwinkel α_2 durch die Gleichung

$$\cos(\alpha_2) = \frac{\sigma_{sg} - \sigma_{sf}}{\sigma_{fg}} \quad (2.1)$$

mit:

α_2	Kontaktwinkel,
σ_{sg}	Grenzflächenspannung zwischen Substrat und Gas,
σ_{sf}	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Substrat,
σ_{fg}	Grenzflächenspannung zwischen Flüssigkeit und Gas

in Beziehung stehen. (Young, 1805)

Grundvoraussetzung für einen dünnen, gleichmäßigen Film ist, dass die Oberflächenspannung σ_{fg} der Flüssigkeit kleiner als die Oberflächenspannung σ_{sg} des Substrats ist. Ein dünner, gleichmäßiger Film, der das Substrat vollständig benetzt, zeichnet sich durch einen Kontaktwinkel α_2 von 0° aus, Abb. 2-9c. Liegt der Kontaktwinkel α_2 über 90° separiert sich die Flüssigkeit auf dem Substrat und es findet keine Benetzung statt, Abb. 2-9a. Dieses Verhalten wird superhydrophob genannt und zeigt sich bei dem sogenannten Lotusblüteneffekt. Dazwischen liegt die partielle Benetzung, Abb. 2-9b. Die Flüssigkeit benetzt

zwar das Substrat, eine vollständige Benetzung findet jedoch nicht statt. Die Flüssigkeit bildet einen Kontaktwinkel α_2 aus, der zwischen 0° und 90° liegt. Die partielle Benetzung setzt ein, wenn die Kohäsionskraft innerhalb der Flüssigkeit kleiner als die Adhäsionskraft zwischen Substrat und Flüssigkeit ist. Die Kohäsionskraft innerhalb der Flüssigkeit zieht die Flüssigkeit in eine Kugelform. Die geringe Adhäsionskraft zwischen Substrat und Flüssigkeit führt zum Spreiten des Tropfens. (Tanner, 1979)

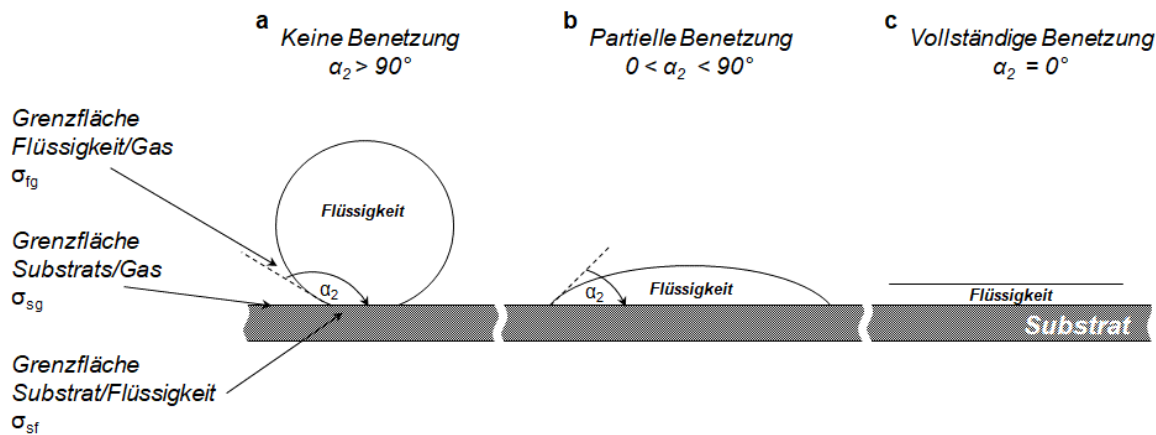


Abbildung 2-9: Benetzungsverhalten einer Flüssigkeit auf einem Substrat. Die Grenzflächenspannungen σ_{fg} , σ_{sg} und σ_{sf} wirken sich auf den Kontaktwinkel α_2 aus. Liegt dieser a) über 90° findet keine Benetzung statt, b) zwischen 0° und 90° findet eine partielle Benetzung statt und c) bei 0° findet eine vollständige Benetzung statt.

Dieses Spreiten bildet die Grundlage für einen flächigen Film. Aufgrund der unterschiedlichen Oberflächenspannungen σ_{sg} des Substrates und σ_{fg} der Tinte, drückt sich die Benetzung eines Substrates mit Tinte durch eine partielle Benetzung aus. Das hydrophile bzw. hydrophobe Benetzungsverhalten kann durch eine raue Oberflächenbeschaffenheit zusätzlich begünstigt werden. (Marmur, 2003)

Die Bildung eines dünnen Filmes aus Tinte auf einem Substrat geht mit einer Bewegung der Tinte einher. Diese Bewegung findet innerhalb einer definierten Zeit, der Nivellierungszeit t_N , statt, bis der Film am weiteren Fließen gehindert wird. Der Druckprozess erzeugt separierte Druckpunkte, die eine charakteristische Topographie, die Tintentopographie, ausbildet. Die Tintentopographie, die sich zu einem Zeitpunkt t_N von 0 Sekunden ausgebildet hat, kann durch eine wellenförmige Funktion beschrieben werden, deren Wellenlänge λ zweier aufeinanderfolgender Spitzen der Topographie darstellt und deren Amplitude der anfänglichen mittleren Schichtdicke h_0 der Topographie entspricht. Diese anfängliche mittlere Schichtdicke h_0 nimmt mit zunehmender Nivellierungszeit t_N um die Schichtdickendifferenz δh ab, Abb. 2-10. Die Wellenzahl k entspricht dem Kehrwert der Wellenlänge λ und beschreibt die Anzahl der Wellenlängen λ innerhalb einer definierten Maßeinheit der Länge x .

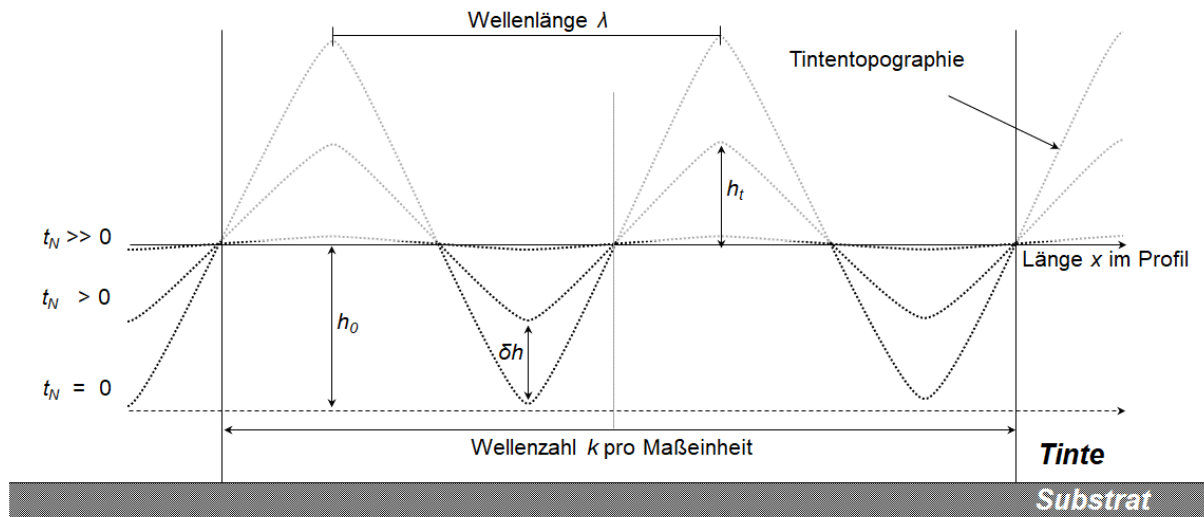


Abbildung 2-10: Darstellung der Topographie einer erzeugten Spur mit der Wellenlänge λ des Spurabstands und die zeitliche Veränderung der Amplitude in Form der Schichtdicke h_t mit zunehmender Nivellierungszeit t_N .

Die zeitliche Veränderung der Schichtdicke h_t kann mit der Kosinusfunktion

$$h_t = h_0 + \delta h \cdot \cos(kt_N) \quad (2.2)$$

mit:

h_t	mittlere Schichtdicke nach einer Nivellierungszeit t_N ,
h_0	anfängliche mittlere Schichtdicke nach einer Nivellierungszeit t_N gleich 0,
δh	Schichtdickendifferenz nach einer Nivellierungszeit t_N ,
k	Wellenzahl als Kehrwert der Wellenlänge λ ,
t_N	Nivellierungszeit

beschrieben werden. (Gennes et al., 2004) Da die Wellenzahl k innerhalb der Kosinusfunktion liegt, und diese den Kehrwert zur Wellenlänge λ bildet, muss die Wellenzahl k in der Gleichung 2.2 durch die Gleichung

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (2.3)$$

mit:

k	Wellenzahl,
λ	Wellenlänge

ersetzt werden. Die zeitliche Veränderung der Schichtdicke h_t wird durch die Druckverteilung in dem dünnen Film verursacht. In der Tinte wirkt, aufgrund der größeren Schichtdicke h_t , unterhalb der Spitzen der Topographie ein größerer hydrostatischer Druck p_{Hyd} als in den Tälern der Topographie, Abb. 2-11. Neben dem hydrostatischen Druck p_{Hyd} wirkt der kapillare Krümmungsdruck p_K (auch: Laplace-Druck). Dieser Druck wirkt an der Grenzfläche zwischen der Tinte und der Luft. Eine starke Krümmung an der Spitze oder im Tal der Topographie entspricht einem kleinen Radius r der theoretischen Kugel, die den Krümmungsradius beschreibt. Der Krümmungsdruck p_K steigt. Da die Tinte danach strebt, den vorherrschenden Krümmungsdruck p_K abzubauen, vergrößert sich der Radius r , wodurch die Krümmung an den Spitzen und in den Tälern der Topographie abnimmt. Gleichzeitig reduziert sich die

Schichtdicke h_t , wodurch der hydrostatische Druck p_{Hyd} verringert wird. Die inhomogene Druckverteilung im dünnen Film bewirkt, dass die Tinte dazu neigt, von den Spitzen in die Täler entlang der Fließrichtung zu fließen, Abb. 2-11. Daraus folgt, dass die gekrümmte Topographie eine Begradigung anstrebt, bis beide vorherrschenden Drücke im Gleichgewicht vorliegen. (Sigloch, 2014) Das Gleichgewicht des hydrostatischen Drucks p_{Hyd} und des Krümmungsdrucks p_K entspricht näherungsweise der Kapillarlänge κ^{-1} .

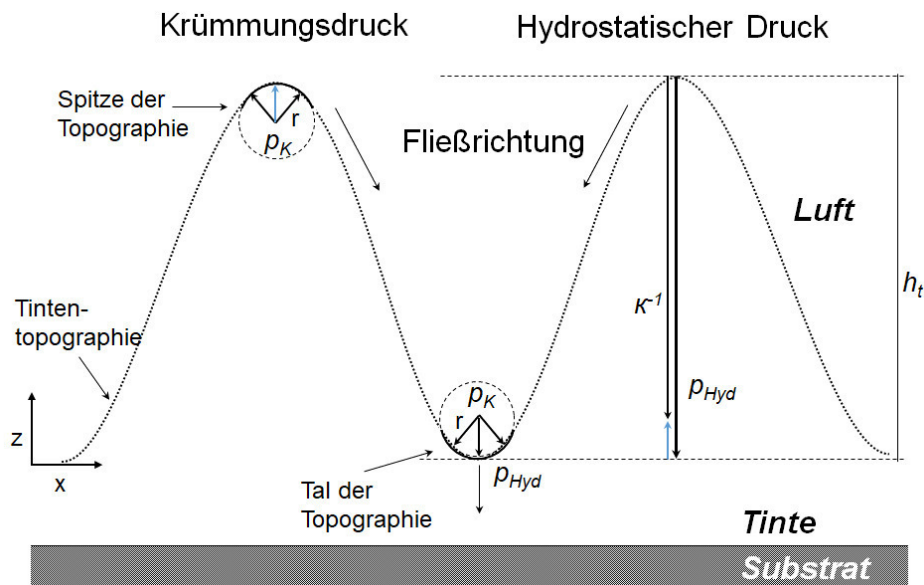


Abbildung 2-11: Schematische Darstellung der vorherrschenden Drücke (Krümmungsdruck p_K und hydrostatischer Druck p_{Hyd}) in der flüssigen Tintentopographie.

Der hydrostatische Druck p_{Hyd} wirkt innerhalb der flüssigen Tinte entlang der z-Richtung der Tintentopographie. Dieser ist größer, sobald mehr Tinte an einer Stelle x vorhanden ist. (Böckh & Saumweber, 2013) Der hydrostatische Druck p_{Hyd} wird durch die Gleichung

$$p_{Hyd} = \rho \cdot g \cdot h_t \quad (2.4)$$

mit:

p_{Hyd}	hydrostatischer Druck,
ρ	Dichte der Tinte,
g	Fallbeschleunigung am Ort,
h_t	mittlere Schichtdicke nach einer Nivellierungszeit t_N

beschrieben. (Atkins & de Paula, 2013) Am höchsten bzw. tiefsten Punkt der Topographie, der Spitze bzw. dem Tal, befindet sich die größte Krümmung. Auf diese Krümmung wirkt der kapillare Krümmungsdruck p_K , der durch die Gleichung

$$p_K = \frac{\sigma_{fg}}{r} \quad (2.5)$$

mit:

p_K	kapillarer Krümmungsdruck,
σ_{fg}	Oberflächenspannung der Tinte,
r	Krümmungsradius

ausgedrückt werden kann (Atkins & de Paula, 2013), am stärksten.

Die Kapillarlänge κ^{-1} entspricht der mittleren Schichtdicke h_t des dünnen Films, die sich nach ausreichender Nivellierungszeit t_N durch den hydrostatischen Druck p_{Hyd} und den kapillaren Krümmungsdruck p_K einstellt. Die Schichtdicke h_t entspricht wiederum dem Krümmungsradius r des kapillaren Krümmungsdrucks p_K . Die Kapillarlänge κ^{-1} kann durch Gleichsetzen des hydrostatischen Drucks p_{Hyd} aus Gleichung 2.4 bei der im Gleichgewicht vorherrschenden Schichtdicke h_t mit dem kapillaren Krümmungsdruck p_K aus Gleichung 2.5, dessen kapillarer Krümmungsradius r der einstellenden Schichtdicke h_t entspricht, berechnet werden. Durch das anschließende Umstellen auf die Schichtdicke h_t , die äquivalent zur Kapillarlänge κ^{-1} ist, ergibt sich die Gleichung

$$\kappa^{-1} = \sqrt{\frac{\sigma_{fg}}{\rho g}} \quad (2.6)$$

mit:

κ^{-1}	Kapillarlänge,
σ_{fg}	Oberflächenspannung,
ρ	Dichte der Tinte,
g	Fallbeschleunigung am Ort

für die Kapillarlänge κ^{-1} .

Bevor sich das Gleichgewicht der Drücke eingestellt hat, hängt die Kapillarlänge κ^{-1} von der zeitlichen Veränderung der beiden vorherrschenden Drücke ab.

Der Krümmungsradius r des kapillaren Krümmungsdruck p_K ist indirekt proportional zur zweiten Ableitung der Amplitude der zeitabhängigen Wellengleichung a_t (Moore & Paterno, 1990), die mit der Gleichung

$$a_t = \delta h \cdot \sin(kt_N) \quad (2.7)$$

mit:

a_t	Amplitude der zeitabhängigen Wellengleichung entsprechend Schichtdicke h_t ,
δh	Schichtdickendifferenz nach einer Nivellierungszeit t_N ,
k	Wellenzahl als Kehrwert der Wellenlänge λ ,
t_N	Nivellierungszeit

beschrieben werden kann. Die Amplitude a_t der zeitabhängigen Wellengleichung entspricht hierbei der Schichtdicke h_t , nach definierter Nivellierungszeit t_N . Wird die zeitabhängige Wellengleichung a_t (Gl. 2.7) nun zweimal nach der Nivellierungszeit t_N abgeleitet und der Kehrwert dieser Ableitung an Stelle des Krümmungsradius r in Gleichung 2.5 eingesetzt, ergibt sich ein kapillarer Krümmungsdruck p_K

$$p_K = \frac{\sigma_{fg}}{\frac{1}{\delta h \cdot k^2 \cdot \sin(kt_N)}} = \sigma_{fg} \cdot \delta h \cdot k^2 \cdot \sin(kt_N) \quad (2.8)$$

mit:

p_K	kapillarer Krümmungsdruck,
σ_{fg}	Oberflächenspannung der Tinte,
δh	Schichtdickendifferenz nach einer Nivellierungszeit t_N ,
k	Wellenzahl als Kehrwert der Wellenlänge λ ,
t_N	Nivellierungszeit t_N ,

der auf die Tintentopographie wirkt.

Bei gleicher Schichtdicke h_0 und unterschiedlicher Wellenlänge λ stellt sich ein unterschiedlicher kapillarer Krümmungsdruck p_K im dünnen Film ein. Aus einer kurzen Wellenlänge λ mit gleicher Schichtdicke h_0 resultiert ein größerer Krümmungsradius r . Dies entspricht einem größeren Druckgradienten des kapillaren Krümmungsdrucks p_K , wodurch dieser verstärkt auf die Topographie wirkt. Für die Kapillarlänge κ^{-1} bedeutet dies, bei ausreichend kleiner Schichtdicke h_0 , dass die Oberflächenspannung σ_{tg} der Tinte vernachlässigbar gering ist. Die treibende Kraft ist die Gravitationskraft F_G , die eine Folge des hydrostatischen Drucks ist. Es bildet sich eine Schwerewelle aus. (Rapp, 2017) Aus einer langen Wellenlänge λ mit gleicher Schichtdicke h_0 resultiert ein kleinerer Krümmungsradius r . Dies entspricht einem kleineren Druckgradienten des kapillaren Krümmungsdrucks p_K , wodurch dieser schwächer auf die Topographie wirkt. Für die Kapillarlänge κ^{-1} bedeutet dies bei ausreichend kleiner Schichtdicke h_0 , dass die Oberflächenspannung σ_{tg} der Tinte den Ausdruck dominiert. Es bildet sich eine Kapillarwelle aus. (Rapp, 2017); (Gennes et al., 2004) Unabhängig des dominierenden Drucks verändert sich die Schichtdicke h_t durch die vorherrschenden Drücke mit der Nivellierungszeit t_N und die wellenförmige Topographie gleicht sich allmählich einer ebenmäßig glatten Form an. Die ebenmäßig glatte Form resultiert aus der Materialwanderung mit zunehmender Nivellierungszeit t_N , die einem Nivellierungsprozess entspricht. Der Nivellierungsprozess zeichnet sich durch den Abbau der Spitzen und Täler der Topographie aus. Die anfangs ausgeprägten Spitze der Topographie reduzieren sich mit zunehmender Nivellierungszeit t_N , da Tinte von dort in die Täler der Topographie fließt. Dieses Fließen führt dazu, dass sich die lokal erhöhte Schichtdicke h_t der Spitzen durch das Abfließen von Tinte in die Täler mit lokal geringerer Schichtdicke h_t ausgleicht und im Laufe der Nivellierungszeit t_N zu einer mikroskopisch planaren Struktur führt. Die dynamischen Fließeigenschaften der Tinte folgt dem Newtonschen Gesetz, in dem die Triebkraft F gleich dem Produkt aus der bewegten Masse m und der Beschleunigung a der Masse ist. Aufgrund des unabhängigen Fließverhaltens der Tinte muss das ganzheitliche System auf infinitesimal kleine Volumenelemente heruntergebrochen werden. (Rapp, 2017) Die Triebkraft F entspricht der Summe der einzelnen Kräfte, wie der Gravitationskraft F_G und der viskosen Kraft F_{visk} . Unter der Bedingung, dass die Tinte inkompressibel ist, können die infinitesimal kleinen Volumenelemente durch die Navier-Stokes Gleichung beschrieben werden. Die Komplexität dieser Gleichung wird durch die Schmierfilm-Theorie (Reynolds, 1886) umgangen, indem die dreidimensionale Gleichung durch das Reduzieren auf zwei Dimensionen vereinfacht wird. Zusätzlich wird eine konstante mittlere Fließgeschwindigkeit v vorausgesetzt.

Durch die Topographie in einem horizontalen Film, sind innerhalb der Tinte zwei Bereiche unterschiedlichen Drücken ausgesetzt: zum einem dem hydrostatischen Druck p_{Hyd} auf den

Spitzen der Topographie, zum anderen dem kapillaren Krümmungsdruck p_K , der den Krümmungsradius r der Spitzen und der Täler der Topographie vergrößern möchte. Die Kraft pro Volumeneinheit, die die Topographie aus einem horizontalen Film entfernen möchte, entspricht einer Druckdifferenz Δp zwischen diesen beiden Bereichen, wodurch Tinte von den Spitzen in die Täler transferiert wird. Unter diesen Bedingungen wird die Navier Stokes Gleichung auf

$$-\frac{\Delta p}{x} + \eta \frac{\delta^2 v}{\delta h^2} = 0 \quad (2.9)$$

mit:

Δp	Druckdifferenz,
x	Länge des Druckdifferenzbereichs,
η	Viskosität der Tinte,
v	mittlere Fließgeschwindigkeit,
δh	Abnahme der mittlere Schichtdicke nach einer Nivellierungszeit t_N

reduziert. Als Randbedingungen ist festzulegen, dass am Rand keine Fließgeschwindigkeit v existiert. Zusätzlich wirkt auf die Tinte eine größere Kraft pro Flächeneinheit als die viskose Kraft F_{visk} in der Tinte selbst, wodurch die Tinte fließen wird. Diese Bedingungen lassen sich in ein Skalengesetz für die mittlere Fließgeschwindigkeit v schreiben. Demnach folgt die mittlere Fließgeschwindigkeit v nach Umstellung der Gleichung 2.9 in Annäherung dem Skalengesetz

$$v \approx \frac{h_0^2 \cdot \Delta p}{\eta \cdot x} \quad (2.10)$$

mit:

v	mittlere Fließgeschwindigkeit,
h_0	mittlere Schichtdicke bei einer Nivellierungszeit t_N gleich 0 s,
η	Viskosität der Tinte,
Δp	Druckdifferenz,
x	Länge des Druckdifferenzbereichs

in Abhängigkeit der Länge x des Druckdifferenzbereichs in der Topographie und der Druckdifferenz Δp .

Der Volumenstrom Q entspricht der mittleren Schichtdicke h_0 , die mit einer Fließgeschwindigkeit v fließt. Wird der Volumenstrom Q durch eine zusätzliche Triebkraft F , in Form eines Druckgradienten auf einer Fläche, in Bewegung gesetzt, kann der Volumenstrom Q mit der Gleichung

$$Q \approx \frac{h_0^3}{\eta} F \quad (2.11)$$

mit:

Q	Volumenstrom,
h_0	mittlere Schichtdicke bei einer Nivellierungszeit t_N gleich 0 s,
η	Viskosität der Tinte,
F	Triebkraft

beschrieben werden. Der Flüssigkeitsdurchsatz Q einer vorherrschenden Kapillarwelle mit einer schwach gekrümmten Spitze der Topographie, kann mit Hilfe des Gradienten des

Krümmungsdrucks ausgedrückt werden. Bei einer Kapillarwelle entspricht die Triebkraft F dem kapillaren Krümmungsdruck p_K auf einer Fläche entsprechend der Kapillarzahl k . Wird der kapillare Krümmungsdruck p_K (Gl. 2.8) multipliziert mit der Wellenzahl k als Fläche A mit der Triebkraft F gleichgesetzt und diese Triebkraft F in die Gleichung 2.11 eingesetzt, ergibt sich ein Volumenstrom Q

$$Q \approx \frac{h_0^3}{\eta} \sigma_{fg} \cdot \delta h \cdot k^3 \cdot \sin(kt_N) \quad (2.12)$$

mit:

Q	Volumenstrom,
h_0	mittlere Schichtdicke bei einer Nivellierungszeit t_N gleich 0 s,
η	Viskosität der Tinte,
σ_{fg}	Oberflächenspannung der Tinte,
δh	Schichtdickendifferenz nach einer Nivellierungszeit t_N ,
k	Wellenzahl als Kehrwert der Wellenlänge λ ,
t_N	Nivellierungszeit

der Kapillarwelle.

Das von den Spitzen abströmende Volumen muss dem aufgetragenen Volumen im Tal entsprechen. Der Flüssigkeitstransport, der dem Flüssigkeitsdurchsatzes Q während dem Nivellierungsvorgang entspricht, wird durch die dominierende Triebkraft F aus den Drücken gesteuert. Der Volumendurchsatz δQ entlang der x-Richtung entspricht der Abnahme der Schichtdicke δh in einem Zeitintervall τ , wodurch die Gleichung

$$\frac{\delta Q}{\delta x} = - \frac{\delta h}{\tau} \quad (2.13)$$

mit:

δQ	Volumendurchsatz mit der Zeit,
δx	Fließstrecke in Fließrichtung x ,
δh	Schichtdickendifferenz,
τ	charakteristisches Zeitintervall

gilt. Wird die Gleichung 2.12 mit der ortsbezogenen Ableitung in die Gleichung 2.13 eingesetzt, und auf das charakteristische Zeitintervall τ umgestellt, liegt das nach De Gennes (Gennes et al., 2004) modifizierte, charakteristische Zeitintervall τ bei

$$\tau = \frac{3\eta}{\sigma_{fg} \cdot h_0^3 \cdot k^4} \quad (2.14)$$

mit:

τ	charakteristisches Zeitintervall,
η	Viskosität der Tinte,
σ_{fg}	Oberflächenspannung der Tinte,
h_0	mittlere Schichtdicke bei einer Nivellierungszeit t_N gleich 0 s,
k	Wellenzahl als Kehrwert der Wellenlänge λ

für den Nivellierungsprozess einer Kapillarwelle. Aufgrund der zeitlichen Veränderung der Schichtdicke h_t mit zunehmender Nivellierungszeit t_N , kann die Entwicklung des Wellenprofils der Kapillarwelle angelehnt an die Gleichung 2.13 nach

$$-\frac{\delta h}{\tau} = -\frac{d\delta h}{dt} \quad (2.15)$$

mit:

$d\delta h$	Differential der Schichtdickenabnahme mit zunehmender Zeit,
dt	Zeitintervall,
δh	Schichtdickendifferenz nach einer Nivellierungszeit t_N ,
τ	charakteristisches Zeitintervall

beschrieben werden. Mit Umstellen der Gleichung 2.15 auf die Schichtdickenkomponenten $d\delta h$ und δh auf die eine Seite und den Zeitkomponenten t und τ auf die andere Seite und dem Einsetzen des zuvor bestimmten Zeitintervalls τ (Gl. 2.14), folgt die zeitliche Änderung der Schichtdicke h_t dem Gesetz

$$-\frac{d\delta h}{\delta h} = -\frac{\sigma_{fg} h_0^3 k^4}{3\eta} dt \quad (2.16)$$

mit:

$d\delta h$	Differential der Schichtdickenabnahme mit zunehmender Zeit,
δh	Schichtdickendifferenz nach einer Nivellierungszeit t_N ,
σ_{fg}	Oberflächenspannung der Tinte,
h_0	mittlere Schichtdicke bei einer Nivellierungszeit t_N gleich 0 s,
k	Wellenzahl als Kehrwert der Wellenlänge λ ,
η	Viskosität der Tinte,
dt	Zeitintervall

in der die Wellenzahl k und somit die Wellenlänge λ mit einer Potenz von 4 einhergeht. (Gennes et al., 2004) Aus der zeitlichen Änderung der Schichtdicke h (Gl. 2.16), die der Amplitude a der Wellenfunktion entspricht, ergänzt mit der Wellenlänge λ aus der Wellenzahl k (Gl. 2.3), ergibt sich nach De Gennes eine Gesamtgleichung der Fluidynamik von

$$\ln\left(\frac{a_0}{a_t}\right) = \left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_{fg} \cdot h_0^3 \cdot t_N}{3 \cdot \lambda^4 \cdot \eta}\right) \quad (2.17)$$

mit:

a_0	anfängliche Amplitude nach einer Nivellierungszeit t_N gleich 0,
a_t	Amplitude nach einer Nivellierungszeit t_N ,
σ_{fg}	Oberflächenspannung der Tinte,
h_0	anfängliche mittlere Schichtdicke nach einer Nivellierungszeit t_N gleich 0,
t_N	Nivellierungszeit der Tinte,
λ	Wellenlänge verursacht durch Druckpunkte,
η	Viskosität der Tinte

mit Hinblick auf einen mit Inkjet gedruckten Film aus Tinte. Die Schichtdicke h ist gleichbedeutend mit der Amplitude a der Wellenfunktion des gedruckten Films. Aufgrund der dünnen Filme auf Basis der Inkjet-Technologie, kann die Trägheit der Tinte vernachlässigt werden. Das Fließverhalten der Tinte wird von der Viskosität η beeinflusst, die im Inkjet in einem Bereich von 1 mPas bis 30 mPas bei einer Anwendungstemperatur von circa 40 °C liegt. (Kipphan, 2000) Neben der Viskosität η , die das Fließverhalten der Tinte steuert, beeinflusst unter anderem die Oberflächenspannung σ das Benetzungsverhalten und die Filmbildung auf dem Drucksubstrat. Diese liegt im Inkjet bei 30 mN/m bis 50 mN/m. (Mimaki

Engineering Co., 2012) ; (Jang et al., 2009) Da die Druckeinstellung des Druckers auf die Tinte abgestimmt ist, ist eine Variation nur schwer möglich.

2.5 Rauheitskenngrößen zur Beschreibung der Substrattopographie

Die Topographie von Oberflächen besitzt eine hohe Komplexität. Je nach Anwendungsfall werden unterschiedliche Anforderungen an die Topographie gestellt, die durch unterschiedliche Kenngrößen nach Norm objektiv beschrieben werden. Zusätzlich zu den Kenngrößen, die die Anforderungen beschreiben, ist das Bezugsfeld, auf das sich die Kenngrößen beziehen, von Relevanz.

Die profilbezogenen Rauheitskenngrößen, wie beispielsweise die mittlere Rauhtiefe, kurz Rauheit R_z , gibt einen singulären Eindruck der Topographie wieder. Das Profil der Substrattopographie mit einer Messstrecke l_r wird in gleich lange Abschnitte λ_c untergliedert. Innerhalb der einzelnen Abschnitte λ_c wird jeweils der betragsmäßige Abstand des Maximums der Profilhöhe z und des Minimums der Profilhöhe z gemessen. Diese betragsmäßigen Abstände entsprechen den Rauheiten R_{z1} , R_{z2} , R_{z3} , R_{z4} und R_{z5} , Abb. 2-12. Die Rauheit R_z ergibt sich aus den aufaddierten Rauheiten R_{z1} , R_{z2} , R_{z3} , R_{z4} und R_{z5} der einzelnen Abschnitte λ_c , die durch die Anzahl der Abschnitte geteilt wird. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2012)

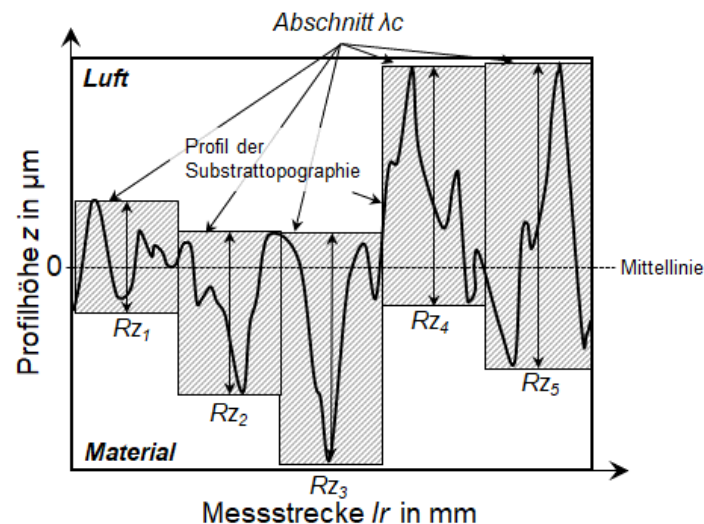


Abbildung 2-12 : Schematische Darstellung der fünf einzelnen Rauhtiefen R_{z1} , R_{z2} , R_{z3} , R_{z4} und R_{z5} der einzelnen Abschnitte λ_c , aus denen aufsummiert die profilbezogen mittlere Rauhtiefe, kurz Rauheit R_z , berechnet wird. Die einzelnen Rauhtiefen ergeben sich aus dem Abstand des Minimums und des Maximums innerhalb eines Abschnitts λ_c .

Neben der Rauheit R_z gibt es die arithmetischen Mittenrauheit R_a . Aus der Substrattopographie wird an einer Stelle ein definiertes Profil extrahiert. Dieses Profil wird durch eine Mittellinie horizontal unterteilt. Die Mittellinie schneidet die Profilhöhe z an dem

Nullpunkt. Der Quotient aus dem bestimmten Integral der Summe der Beträge aller Profilwerte über die Messstrecke l_r wird die arithmetische Mittenrauheit R_a gebildet, Abb. 2-13.

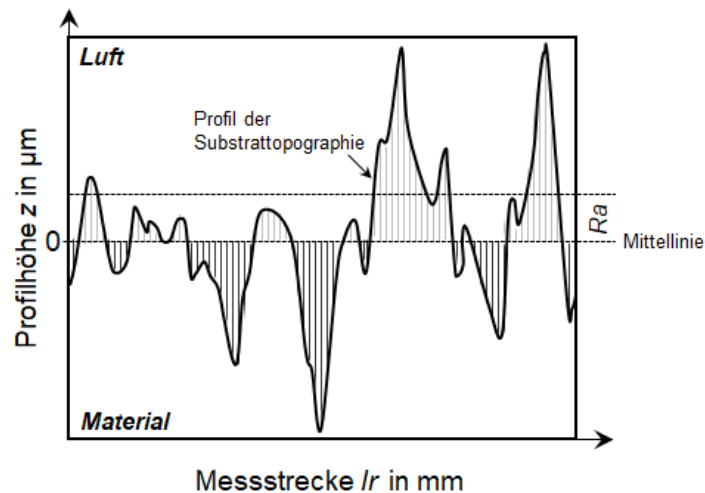


Abbildung 2-13: Schematische Darstellung der profilbezogenen arithmetischen Mittenrauheit R_a als vereinfachte Darstellung der flächenbezogenen arithmetischen Mittenrauheit S_a .

Diese profilbezogenen Rauheitskenngrößen können bei mechanisch bearbeiteten Topographien ausreichen. Die flächenbezogene Rauheitskenngröße, wie beispielsweise die arithmetische Mittenrauheit S_a , hingegen bezieht eine vorher definierte Fläche in den Kennwert mit ein. Dieses ist besonders bei einer Topographie mit stochastisch verteilten Strukturelementen sinnvoll, da ein einzelner Profilschnitt den Wert verfälschen kann. Die flächenbezogene arithmetische Mittenrauheit S_a verhält sich analog zur profilbezogenen arithmetischen Mittenrauheit R_a mit dem Unterschied, dass sich die Rauheit auf eine Messfläche MF an Stelle einer Messstrecke l_r bezieht. Es wird das bestimmte Integral der profilbezogenen arithmetischen Mittenrauheit R_a um das Integral in y-Richtung erweitert und der Quotient aus dem Wert des Integrals und der Messfläche MF gebildet. Die arithmetische Mittenrauheit S_a entspricht der mittleren Abweichung der arithmetischen Mittelwerte der Rauheitsgrößen im Betrag zur mittleren Fläche der Rauheitstopographie innerhalb der aufgenommenen Messfläche MF . Die arithmetische Mittenrauheit S_a ist unempfindlich gegenüber Ausreißern. Sie gibt jedoch keine detaillierte Auskunft über den Zustand der Topographie.

Die flächenbezogenen Rauheitskenngrößen Kernrauheit S_k , reduzierte Spitzenhöhe S_{pk} und reduzierte Riefentiefe S_{vk} nehmen auf den Zustand der Topographie stärker Rücksicht.

Das Funktionsprinzip dieser flächenbezogenen Kenngrößen wird anhand der profilbezogenen Kenngrößen Kernrauheit R_k , reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} und reduzierte Riefentiefe R_{vk} erklärt, die sich analog zu den flächenbezogenen Kenngrößen verhalten. Lediglich der Schnitt in definierten Profilhöhen z entspricht bei den profilbezogenen Kenngrößen einer Geraden in

x-Richtung. Diese Gerade wird bei der Ermittlung der flächenbezogenen Kenngrößen mit einer Fläche in x-y Ebene ersetzt.

Das Profil besteht entlang der Messstrecke l_r aus einer Vielzahl an lokalen Höhen und Tiefen. Diese sind in unterschiedlichen Profilhöhen existent, Abb. 2-14a. An der maximalen Profilhöhe z_{max} wird ein waagrechter Schnitt durchgeführt. An diesem Schnitt ist kein Material vorhanden, und somit ist der Materialanteil R_{mr} im Verhältnis zum gesamt möglichen Materialanteil, bezogen auf die Messstrecke l_r , an dieser Profilhöhe entsprechend 0 %. Wird ein Schnitt unterhalb der maximalen Profilhöhe z_{max} bei einer Profilhöhe z_1 gesetzt, werden die lokalen Höhen mit den Flächen A_1 , A_2 und A_3 gekappt. Das Verhältnis des vorhandenen Materials zum gesamt möglichen Materialanteil bezogen auf die Messstrecke l_r ergibt einen Materialanteil R_{mr} an der entsprechenden Profilhöhe z , an der der Schnitt durchgeführt wurde. Die Durchführung einzelner, infinitesimal kleiner Schnitte mit abnehmender Profilhöhe erzeugt die Abbott-Kurve, die den Materialanteil R_{mr} des Profils in Relation zum Gesamtanteil des Materials bezogen auf die Messstrecke l_r an einer definierten Profilhöhe z zeigt, Abb. 2-14b. Oberhalb eines Schnittes bei einer Profilhöhe z_1 liegen die Flächen der lokalen Höhen A_1 , A_2 und A_3 , die entsprechend addiert, der Fläche der Abbott-Kurve bis zu einem Materialanteil Mr_1 in Prozent in Bezug auf die gesamte Fläche einnimmt, Abb. 2-14b. Zur Ermittlung der Kernrauheit R_k wird eine Sekante, die eine Länge von mindestens 40 % Materialanteil besitzt, auf der Abbott-Kurve bis zur geringsten Neigung verschoben. Die Schnittstelle der verlängerten Sekante mit der y-Achse zum einen bei 0 % Materialanteil und zum anderen bei 100 % Materialanteil umfasst den Bereich der Kernrauheit R_k . Das flächengleiche Dreieck mit der Basislänge Mr_1 zu den im Profilschnitt vorhanden und aufaddierten Spitzenflächen bestimmt den Grenzwert der reduzierten Spitzenhöhe R_{pk} . Die reduzierte Riefentiefe R_{vk} umfasst das flächengleiche Dreieck der aufaddierten Riefenflächen mit der Basislänge 100- Mr_2 . (Gayduschek et al., 2017)

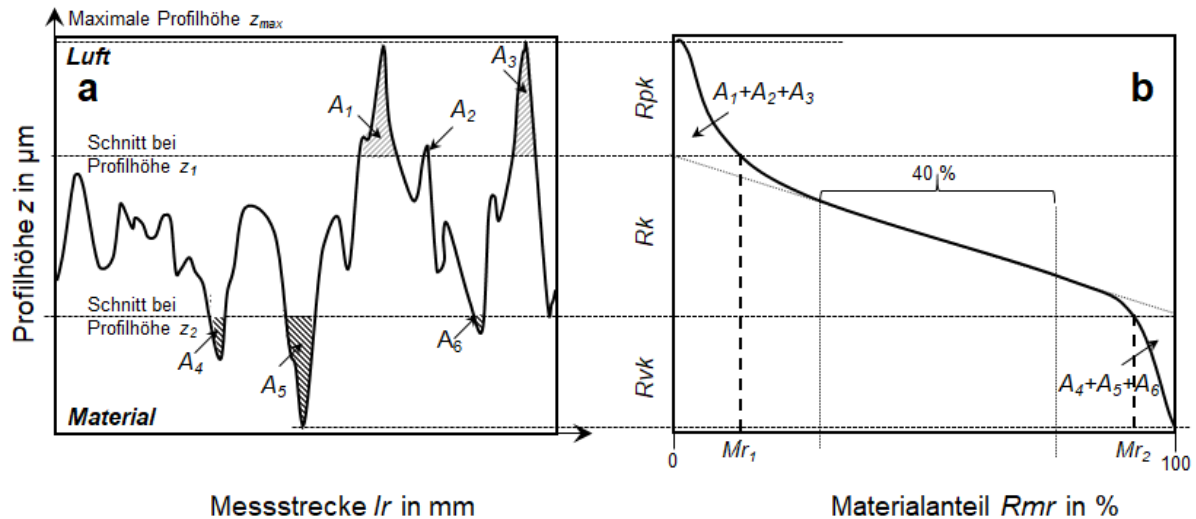


Abbildung 2-14: Prinzipdarstellung der profilbezogenen Kenngrößen Kernrauheit R_k , reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} und reduzierte Riefentiefe R_{vk} als vereinfachte Darstellung der flächenbezogenen Kenngrößen Kernrauheit S_k , reduzierte Spitzenhöhe S_{pk} und der reduzierten Riefentiefe S_{vk} . a) Darstellung eines Topographieprofils mit unterschiedlichen Profilhöhen über eine Messstrecke l_r und b) die Ableitung der Abbott-Kurve aus den Flächen des geschnittenen Materials an einzelnen Profilhöhen z des Topographieprofils. [aus (Gaydushek et al., 2017)]

Da die lasergesinterten Bauteile eine Topographie mit stochastisch verteilten Strukturelementen besitzen, wird der Fokus in dieser Arbeit auf die flächenbezogenen Rauheitskenngrößen gerichtet. Die unterschiedlichen flächenbezogenen Rauheitskenngrößen werden in der geometrischen Produktspezifikation der DIN EN ISO 25178-2:2012 beschrieben. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2012)

3 Stand der Technik und Zielsetzung

Die Herausforderungen, die bei der Kombination der Lasersinter-Technologie und der Inkjet-Technologie entstehen können, werden zum einen von der Oberflächenqualität des lasergesinterten Bauteils und zum anderen von der Oberflächenqualität des Inkjet-Drucks geprägt. Der schichtweise Aufbau des Herstellungsprozesses des Lasersinterns, der die Geometrievielfalt ermöglicht, beeinträchtigt die Oberflächenqualität der Bauteile. Die Dimension dieser Beeinträchtigung wird in diesem Kapitel genauer betrachtet. Der Inkjet-Druck hat aufgrund der Aneinanderreihung einzelner Druckpunkte eine charakteristische Topographie, die bedingt durch den tröpfchenweisen Auftrag entsteht. Der Einfluss des Untergrundmaterials auf das Fließverhalten und somit auf die Druckbildqualität wird, ebenso wie der Einfluss der unbedruckten Substrattopographie auf die Druckbildqualität, in diesem Kapitel näher betrachtet. Zuletzt ergibt sich aus den erörterten Herausforderungen die Zielstellung dieser Arbeit.

3.1 Oberflächenqualität von lasergesinterten Bauteilen

Die Einflussfaktoren auf die Oberflächenqualität der per Lasersintern hergestellten Bauteile sind zum einen der Fertigungsprozess der Bauteile an sich, die Positionierung des Bauteils im Bauraum, sowie die Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente. Zum anderen das Pulver, das aus definierten Körnern besteht und für das Lasersintern verwendet wird. Das Lasersintern, welches wiederum auf die Oberflächenqualität Einfluss nimmt. Da das Pulver während des Prozesses einer konstanten, thermischen Belastung ausgesetzt ist und das Pulver somit altert, wird die Recyclingrate als zusätzlicher Faktor herangezogen.

Diese Einflussgrößen und deren Auswirkung auf die Oberflächenqualität eines Lasersinterbauteils werden in den folgenden Unterkapiteln näher betrachtet.

3.1.1 Einfluss des Fertigungsprozesses

Der Fertigungsprozess des selektiven Lasersinterns von Kunststoffbauteilen hat neben den gerätespezifischen Einflussgrößen, wie zum Beispiel der Laserleistung des Lasers, weitere Einflussgrößen, die nicht beeinflusst, jedoch angepasst werden können.

Eine hohe Produktivität des selektiven Lasersinterns wird erreicht, wenn die einzelnen Bauteile im Bauraum möglichst dicht gepackt sind. Die Fertigung erzeugt lokal eine höhere Temperatur, sodass das Pulver an den vorgegeben Stellen zu schmelzen beginnt. Blattmeier zeigt, dass unterschiedliche Wärmeverteilung im Pulverbett während der Fertigung einen unterschiedlichen Schrumpf der einzelnen Schichten verursacht. Sie erklärt dies mit einer hohen Temperatur, die das Material verflüssigt, wodurch die Dichte zunimmt. Die Zunahme der Dichte reduziert das Volumen der einzelnen Schicht. Blattmeier führt auf, dass sich durch eine Veränderung des Wärmeeintrags, die Volumina unterscheiden und es zu einer Abweichung des Ist-Zustands vom Soll-Zustand kommt. Es entstehen ausgeprägte

Linienstrukturen, die die Oberflächenqualität negativ beeinflussen. (Blattmeier, 2012) Diese Linienstruktur definiert Yusoff als „Orange Peel“-Effekt, in dem Volumenelemente unterschiedlich stark verdichtet werden. Er zeigt, dass dieser Effekt lediglich an den Oberflächen in Baufortschrittsrichtung entstehen. (Yusoff, 2007) Grimm et al. bestätigen diese These. (Grimm et al., 2015) Die lokale Wärme kann durch die Positionierung der Bauteile im Bauraum beeinflusst werden. Blattmeier zeigt, dass nahe aneinander liegende Bauteile ausgeprägte Linienstrukturen aufweisen, deren Entstehung auf direkte Wärmetransportphänomene zurückzuführen sind. (Blattmeier, 2012) Unter Berücksichtigung, dass die Abstände zwischen den Bauteilen ausreichend weit gewählt wurden, stellen sich zusätzliche Topographien durch den Fertigungsprozess ein. Die Lage der Bauteiloberfläche in Baufortschrittsrichtung verursacht unterschiedliche Rauheiten. Blattmeier untersucht die Oberflächenqualität der laserzugewandten zur laserabgewandten Seite einer konkaven Kugelstruktur und zeigt, dass die laserzugewandte Seite eine detailgetreuere Wiedergabe besitzt als die laserabgewandte Seite. (Blattmeier, 2012) Die laserabgewandte Seite entspricht der Bauteillage 180° zur Baufortschrittsrichtung. Die laserzugewandte Seite dementsprechend 0° zur Baufortschrittsrichtung. Bacchewar et al. analysieren den Zusammenhang zwischen laserzugewandter und laserabgewandter Seite in Abhängigkeit der Rauheit. Sie bestätigen die sichtbaren Ergebnisse von Blattmeier mit den Erkenntnissen der Rauheitskenngrößen. Sie führen dieses auf anhaftendes Pulver in den Stufen zurück. (Bacchewar et al., 2007) Fox et al. erweitern die Untersuchung auf überhängende Strukturen. Sie zeigen, dass bei Bauteillagen von 150° zur Baufortschrittsrichtung teilweise angeschmolzene Pulverteilchen an der Schmelze haften bleiben, während bei Bauteillagen größer 150° zur Baufortschrittsrichtung die Pulverschmelze die Oberfläche dominiert. (Fox et al., 2016) Eine ganzheitliche Betrachtung des Einflusses der Bauteillage im Bauraum führt Sauer an und er zeigt, dass die Rauheit R_z bis 10° Verkipfung zur Maschinenplattform zunimmt und von da an bis 40° konstant bleibt. Ab einem Winkel von 40° verringert sich die Rauheit wieder. Er bemerkt, dass die Rauheit zwischen 90° und 180° stetig ansteigt. Dies führt er auf eine steigende Anzahl an angeschmolzenen Pulverkörnern zurück. (Kühnlein et al., 2012; Sauer, 2005) Kühnlein et al. zeigen unter anderem in ihrer Untersuchung zu maskengesinterten Bauteilen, dass die Bauteillage in Baufortschrittsrichtung mitverantwortlich für abgerundete Kanten ist und die Linienausprägung aus dem Fertigungsprozess verstärkt wird. (Kühnlein et al., 2012) Diese Linienausprägung bestätigt den in der Theorie nach Gebhardt dargestellten Stufeneffekt. Die höhere Rauheit bei geringen Winkellagen entsteht durch die unterschiedlich ausgeprägten Volumenelemente, die sich bei geringen Winkeln weniger überlagern. Besonders bei geringen Winkellagen ist der Stufeneffekt, der auf den schichtweisen Aufbau zurückzuführen ist, stärker sichtbar. Die einzelnen Volumenelemente stellen einzelne Grenzschichten dar, die sich mikroskopisch unterscheiden. Die einzelnen Schichten sind

aufgrund der Fertigung erkennbar. Diese wirken sich auf die Rauheit aus. (Gebhardt, 2013) Die Literatur zeigt, dass die Bauteillage im Bauraum die Oberflächenqualität negativ beeinflussen kann. Weitere Phänomene begünstigen die Oberflächenqualität wieder. Mit Hilfe des „Fülleffekts“, bei dem umliegendes loses Pulver an der Schmelze haften bleibt, kann dieser Stufeneffekt verringert werden, Abb. 3-1. Bacchewar et al. zeigen, dass die Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente aus dem additiven Fertigungsprozess, wie auch die Laserleistung, diesen Fülleffekt verstärkt. Eine geringe Schichtdicke h_s der Volumenelemente verringert grundlegend die Ausprägung der Stufen. Eine hohe Laserleistung schmelzt die Pulverkörner auf, wodurch sich die körnige Struktur des Pulvers verflüssigt und eine Schmelze bildet. An dieser Schmelze bleiben umliegende Pulverkörner anhaften. Da die Pulverkörner eine geringere Struktur abbilden als eine geometrische Stufenstruktur besitzt, wird die Stufe aufgefüllt und folglich reduziert, Abb. 3-1. (Bacchewar et al., 2007)

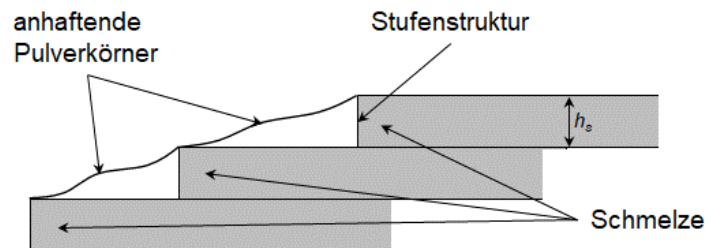


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung des "Fülleffekts" der geometrischen Stufe. An der Schmelze, die eine Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente besitzt, bleibt umliegendes Pulver anhaften und füllt so die Stufenstruktur aus. Die Oberfläche wird verbessert. [nach (Bacchewar et al., 2007)]

Eine weitere Methode führen Danjou und Kohler an, indem sie zeigen, dass die Präzision des Bauteils in Baufortschrittsrichtung und somit der Stufeneffekt durch das „adaptive Slicing“ der Schichten mit einer variablen Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente verbessert wird. Das adaptive Slicing variiert die Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente, aus denen das Bauteil aufgebaut wird, wodurch die Ist-Struktur der Soll-Struktur stärker annähert, Abb. 3-2. Liegt auf dem Bauteil eine hohe Krümmung vor, wird bei gleichbleibender Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente aus dem gleichmäßigen Slicing der Stufeneffekt stark ausgeprägt, da die Soll-Struktur von der Ist-Struktur stärker abweicht, Abb. 3-2 links. Durch die Variation der Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente aus dem adaptiven Slicing wird bei hohen Krümmungen die Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente dort reduziert, da sich die Soll-Struktur der Ist-Struktur stärker annähert. Die aufeinanderfolgenden Volumenelemente weichen weniger stark voneinander ab, wodurch der Stufeneffekt abgeschwächt wird, Abb. 3-2 rechts. Folglich nimmt die Rauheit mit abnehmender

Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente ab. Die Ausprägung der Stufen verringert sich und das Bauteil wird dem Original ähnlicher. (Danjou & Kohler, 2010)

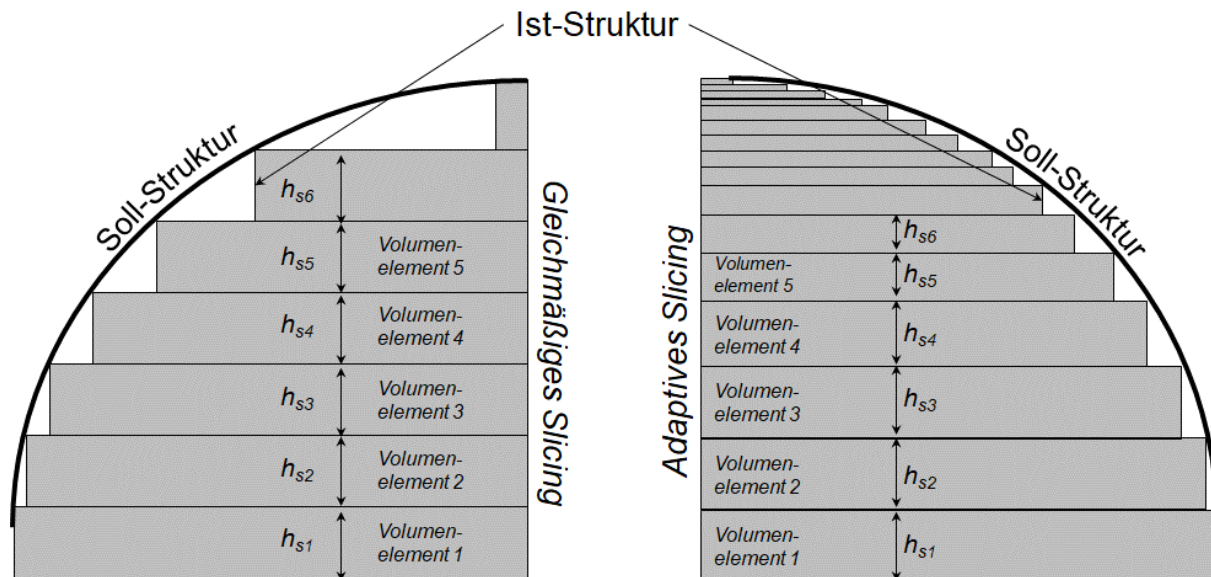


Abbildung 3-2: Schematischer Vergleich des gleichmäßigen mit dem adaptiven Slicing bei zunehmender Schicht. Die Ist-Struktur gleicht sich der Soll-Struktur (schwarzer Halbkreis) bei dem adaptiven Slicing durch die variable Schichtdicke h_s stärker an und die gewünschte Kontur kann originalgetreuer hergestellt werden.

Dies zeigt, dass die Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente auf Basis des Volumenelements ein entscheidender Faktor für die resultierende Topographie des lasergesinterten Bauteils ist. Eine reduzierte Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente auf Basis des Volumenelements bedeutet auch ein dünneres Volumenelement, das stärker der Soll-Struktur entspricht. Die Topographie, die aufgrund des Stufeneffekts entsteht, kann mit diesen Maßnahmen reduziert, jedoch nach Stand der Technik nie vollständig beseitigt werden, da dieser Stufeneffekt momentan ein Charakteristikum der additiven Fertigung darstellt. (Gebhardt, 2013) Die geometrisch günstigste Bauteillage im Bauraum basierend auf den möglichen Effekten analysieren Martha und Köhler und zeigen auf, dass das Bauteil aufgrund seiner Dreidimensionalität vergleichsweise ebenmäßige wie auch raue Oberflächen besitzen wird. Die geeignete Bauteillage muss aus diesem Grund nach Anwendungsfall entschieden werden, da die Stützkonstruktion und die Schichtdicke h_s der einzelnen Volumenelemente einen Einfluss auf die Oberflächenqualität besitzen. (Martha & Köhler, 2011)

3.1.2 Einfluss des Pulvers

Das Pulver, das der Oberfläche eine charakteristische Topographie mit entsprechender Rauheit gibt, besitzt eine definierte Kornform, -größe und -verteilung.

Die Kornform entscheidet über die Fließfähigkeit des Pulvers. Schmid et al. führen an, dass die Kornform von herkömmlichen Pulvern für das Lasersintern einer Kartoffelform gleicht. Die

sphärische Form dieser Körner begünstigt die Fließfähigkeit und bildet eine homogene Verteilung des Pulvers auf dem Pulverbett. Zusätzlich nimmt die Kornform Einfluss auf die Bauteildichte, da das gleichmäßig verteilte Pulver durch die homogene Kornform im Pulverbett eine homogene Dichteverteilung ermöglicht. Dieses führt zu einer besseren Oberflächenqualität der resultierenden Bauteile. (Schmid & Wegener, 2016) Deformierte Körner können während dem Aufrakeln einer neuen Pulverschicht eine Spur in dem Pulverbett verursachen. Dies beeinflusst die Oberflächenqualität negativ. Die Korngröße und die Korngrößenverteilung nehmen ebenso Einfluss auf die Topographie des Bauteils. Spath zeigt, dass große Körner im Allgemeinen eine geringere Packungsdichte als kleinere Körner besitzen. Die geringere Packungsdichte verursacht größere Freiräume zwischen den Körnern, was in einer größeren Rauheit resultiert. Eine große Packungsdichte ist somit für ein Bauteil mit einer geringen Rauheit und einer hohen Bauteildichte erwünscht. Die Korngröße kann jedoch nicht beliebig verringert werden. Der Einsatz von kleinen Korngrößen wird durch interpartikuläre Kräfte, die zur Agglomeration führen, limitiert. Spath führt an, dass kleine Körner aufgrund ihrer Anziehungskraft agglomerieren und eine deformierte Einheit bilden. Diese Einheit verschlechtert das Fließverhalten des Pulvers, was zu einer höheren Rauheit führt. (Spath, 2014) Zudem kann eine geringe Korngröße den Fertigungsprozess beeinflussen. Tumer et al. zeigen auf, dass bei der Verwendung einer geringen Korngröße im Fertigungsprozess neben der Agglomeration, die Vibrationen der aufragenden Rakel bzw. Rollen des Frischpulvers sich in dem Pulverbett abzeichnen. Diese treten während dem Sinterprozess in den Vordergrund und es zeigt sich, dass durch ein zu feines Pulver die Rauheit der Oberfläche wieder verschlechtert wird. (Tumor et al., 1998) Spath zeigt auf, dass eine ausgewogene Korngrößenverteilung freie Hohlräume auffüllen kann und so die Packungsdichte des Pulverbetts zusätzlich erhöht wird. Die Korngrößenverteilung umfasst bestenfalls einen gewissen Anteil an feinen, wie auch an groben Körnern, da kleine Körner in die Freiräume der großen aneinander liegenden Körner im Pulverbett eindringen können und somit auffüllen. Dies begünstigt die Packungsdichte des Pulverbetts und daraus resultiert ein dichteres Bauteil. Dieses auffüllende Verhalten von kleinen Körnern nimmt Einfluss auf die Topographie. Zusätzlich erläutert er, dass große Partikeldurchmesser weniger kohärente Kräfte besitzen und somit die Fließfähigkeit positiv beeinflussen. (Spath, 2014) Rechtenwald et al. setzen die mittlere Korngröße in Bezug zur resultierenden Rauheit. Sie fanden heraus, dass die resultierende Rauheit des lasergesinterten Materials der halben mittleren Korngröße des Ausgangspulvers entspricht. (Rechtenwald et al., 2010) Die Korngrößenverteilung liegt bei konventionell verfügbaren Pulvern im Bereich zwischen 20 µm und 80 µm. (EOS GmbH, 2018); (Schmid & Wegener, 2016). Sauer und Witt zeigen anhand von REM Aufnahmen, dass aufgrund der Temperierung der Baukammer einzelne Körner agglomerieren und die Korngrößenverteilung des Pulvers im Laufe des Fertigungsprozesses zunimmt. Die

temperaturbezogene Agglomeration der kleinen Körner reduziert deren Anteil, wodurch die Korngrößenverteilung verschoben wird. Da während dem Fertigungsprozess eine thermische Belastung des Pulverbetts stattfindet, schmelzen die Pulverkörner an und die anliegenden Körner bleiben aneinanderhaften. Dieses Agglomerat besitzt eine größere Korngröße als das Ausgangskorn. Zusätzlich verändert sich die Form der ursprünglich sphärischen Partikel zu einem deformierten Korn. (Sauer & Witt, 2004) Beides wirkt sich auf das Fließverhalten und die Packungsdichte aus und beeinflusst somit die Topographie, wie Wegner und Witt anführen. (Wegner & Witt, 2012) Dass sich die Alterung des Pulvers auch auf die Schmelzviskosität auswirkt, untersuchen Drummer et al. Sie zeigen, dass das Pulver aufgrund der hohen Temperatur nachvernetzt und somit die Schmelzviskosität mit zunehmender Alterung steigt. (Drummer et al., 2010) Begründet liegt dies in der thermische Belastung, die die chemische Struktur des Polyamids während dem Fertigungsprozess verändert, was zu einer erhöhten Schmelzviskosität führt. Eine erhöhte Schmelzviskosität bedeutet, dass das flüssige Volumenelement langsamer fließt und somit Einfluss auf die Kontur des Bauteils hat. Yusoff zeigt in seiner Arbeit, dass eine geringe Schmelzviskosität zusätzlich den „Orange-Peel“-Effekt begünstigt. Die Schmelze erstarrt an unterschiedlichen Erstarrungsorten und es entsteht eine wellige Oberfläche. (Yusoff, 2007) Dieses Verhalten wird ebenso von der Recyclingrate begünstigt, wie Pham et al. zeigen. Sie untersuchen den Einfluss der Recyclingrate des Pulvers auf den „Orange-Peel“-Effekt. Die Resultate zeigen, dass mit zunehmender Recyclingrate die Ausprägung des „Orange-Peel“-Effekts verstärkt wird. (Pham et al., 2007) Wegner und Witt erweitern die Untersuchung der Recyclingrate des Pulvers auf den Zyklus der Recyclingrate und zeigen mit ihrer Arbeit, dass schon nach der ersten Alterungsstufe der „Orange-Peel“-Effekt auftritt. (Wegner & Witt, 2012) Die Untersuchungen zu diesem Thema zeigen, dass durch eine ausgewogene Recyclingrate, die sich aus der Mischrate zwischen Neupulver und unverbrauchtem, thermisch vorbelasteten Material (Recyclingpulver) aus dem vorhergehenden Fertigungsprozess den „Orange-Peel“-Effekt zugunsten einer besseren Oberflächenqualität beeinflusst. (Yusoff, 2007) Diese Mischrate ist entscheidend für die Wirtschaftlichkeit des Lasersinterns. Kaddar gibt an, dass das Recyclingpulver mit einer Recyclingrate von 30 % bis 50 % mit Neupulver gemischt wird. (Kaddar, 2010) Sauer und Witt zeigen in ihrer Untersuchung der Kornform, dass durch die Recyclingrate thermisch vorbelastetes Pulver mit agglomerierten Pulverkörner in den neuen Fertigungsprozess eingebracht werden. Mit zunehmendem Recyclingzyklus liegt mehrfach gealtertes Recyclingpulver im Fertigungsprozess vor. Die entstandene Pulvermischung aus recyceltem und frischem Pulver besitzt eine größere Korngrößenverteilung als das reine Neupulver. Dies bewirkt, dass die Oberflächenrauheit mit jedem weiteren Recyclingdurchgang zunimmt. (Sauer & Witt, 2004)

3.2 Oberflächenqualität des Inkjet-Drucks

Unter der Oberflächenqualität des Inkjet-Drucks wird in dieser Arbeit in erster Linie nicht die Druckbildqualität verstanden, sondern die Topographie des gedruckten Ergebnisses. Diese ist abhängig von den Druckeinstellungen, welche die Druckpunktgröße und -position beeinflussen, wie auch von dem anschließenden Trocknungsvorgang, der die Topographie der Tinte bestimmt. Neben dem Einfluss des Druck- und Trocknungsvorgangs beeinflusst das Material des Substrats das Verhalten der Tinte auf dem Substrat. Papier, Holz oder auch Kunststoffe sind Materialien, die beispielsweise für individuelles Bedrucken mit Inkjet genutzt werden. Die unterschiedlichen Materialien besitzen unterschiedliche Oberflächenspannungen, die in Kombination mit der Oberflächenspannung der Tinte die Filmbildung steuern. Zusätzlich besitzen diese Bedruckstoffe unterschiedliche Substrattopographien, die Einfluss auf die Druckbildqualität nehmen. Während die Holzindustrie mit Singularitäten wie herausstehenden Fasern herausgefordert wird, liegen bei Kunststoffen vor allem Strukturelemente wie Krater vor. In den folgenden Unterkapiteln sollen diese Einflussfaktoren auf den Inkjet-Druck näher betrachtet werden.

3.2.1 Einfluss des Druck- und Trocknungsvorgangs

Für ein ebenmäßiges Druckbildergebnis spielen die Position und die Form der Druckpunkte eine wichtige Rolle. Es wird eine halbkugelförmige Druckpunktform angestrebt. Die Farbenvielfalt entsteht dadurch, dass einzelne Druckpunkte aus unterschiedlichen Grundfarben (CMYK) gemischt werden. Der Auftrag, der tröpfchenweise stattfindet, führt zu einer charakteristischen Tintentopographie. Diese ist geprägt durch gleichmäßige, separierte Druckpunkte, die perlenkettenförmig aneinandergereiht werden. Der Abstand der Druckpunkte ist abhängig von der Auflösung und entspricht bei einer Auflösung von 600 x 600 dpi einem Druckpunktabstand d von circa 42 μm , Abb. 3-3.

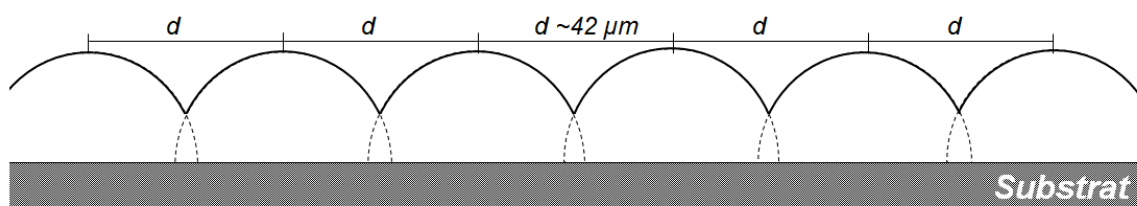


Abbildung 3-3: *Der Querschnitt durch die gedruckte Schicht stellt die charakteristische Tintentopographie einer Inkjet gedruckten Schicht dar. Dieses zeichnet sich aus durch eine gleichmäßige, perlenförmige Anordnung der halbkugelförmigen Druckpunkte mit konstanten Druckpunktabstand d von 42 μm bei einer Auflösung von 600 x 600 dpi.*

Hue stellt einen Überblick über den Fortschritt der Inkjet-Technologie zusammen. Er zeigt mit Hilfe von REM Aufnahmen, dass die Form der Druckpunkte, direkt nach der Applikation, einzelnen halbkugelförmiger Strukturen gleicht. Die Druckpunkte liegen separiert vor. Während des Trocknungsvorgangs schrumpft die Oberfläche und es bildet sich eine

Haut. (Hue, 1998) Sefiane führt auf, dass es bei der Trocknung eines Druckpunktes zu dem Coffee-Strain Effekt kommt. Die involvierten Pigmente fließen an den Rand des Druckpunktes und sammeln sich dort an. Die Pigmente liegen heterogen verteilt vor und der visuelle Eindruck wird verschlechtert. (Sefiane, 2014) Yoo und Kim, wie auch Wijshoff, betrachten die Form des Druckpunktes, von der Druckpunkterzeugung, über das Auftreffen auf das Substrat, bis hin zur Trocknung. Sie zeigen, dass die Füllpartikel die Druckpunkterzeugung und das Verhalten des Tropfens während dem Auftreffen nicht beeinflussen. Das Trocknungsmuster des Druckpunktes steht jedoch in Verbindung mit dem Ausbreitungsmechanismus des mit Farbpigmenten gefüllten Tintensystems. (Yoo & Kim, 2015); (Wijshoff, 2018) Siregar et al. entwickeln in diesem Zug ein numerisches Modell, das die Trocknung des mit Inkjet gedruckten Druckpunktes beschreibt. Als Basis nehmen sie die Navier-Stokes-Gleichung, die mit der Schmierfilmtheorie vereinfacht wird. (Siregar et al., 2013) Zapka et al. geben einen Einblick in den Einfluss der Temperatur auf die Trocknung von wasserbasierenden Tinten. Sie zeigen, dass eine erhöhte Temperatur des Substrats die leichtflüchtigen Anteile in der Tinte schneller verdampfen lassen. Der Druckpunkt wird an der Spreitung gehindert und behält seinen geringeren Durchmesser. (Zapka, 2018) Holmann et al. untersuchen das Spreitverhalten von Inkjet gedruckten Druckpunkten auf porösem Untergrund. Sie zeigen, dass sowohl die Infiltrierung des Druckpunktes wie auch die Ausbreitung gleichermaßen zeitabhängig sind. Die Infiltrationsrate begrenzt die Ausdehnung des Tropfens. Diese wiederum wird durch den Porendurchmesser von auf der Oberfläche befindlichen Poren beeinflusst. (Holman et al., 2002)

Ein gedruckter Film besteht aus einer Vielzahl gleichmäßig aneinander gereihter Druckpunkte, die entsprechend spreiten. Die einzelnen Druckpunkte werden in dem Inkjet Druckverfahren bei einem monochromen Farbton nebeneinander abgesetzt. Die Formation der einzelnen Druckpunkte gleicht einer gleichmäßig perlenförmigen Anordnung, die eine dünne, gedruckte Schicht erzeugt. Mu et al. untersuchen die Veränderung des Profils einer mit Inkjet gedruckten dünnen Schicht. Sie zeigen, dass ein konstanter Druckpunktastand ein konvexes Profil der Schicht verstärkt. Durch einen variablen Druckpunktastand in Richtung der Druckmitte kann die Tinte nicht akkumulieren. Der durch den konstanten Druckpunktastand erzeugten konvexen Form wird entgegengewirkt. (Mu et al., 2017) Duineveld reduziert die Fläche auf eine mit Inkjet gedruckte Linie. In seinen Untersuchungen analysiert er die Instabilität einer solchen Linie. Er zeigt, dass die Linienstruktur mit zunehmender Spreitung der einzelnen Druckpunkte instabil wird. Der gleichmäßige Rand nimmt zunehmend wellenförmige Formen an, die abhängig von den Druckpunktaständen sind. (Duineveld, 2003) Soltman und Subramanian untersuchen die Form der gedruckten Linien. Sie zeigen, dass die Linie mit zunehmendem Druckpunktastand eine ausgeprägtere Münzschichtstruktur aufweist. Dies beeinflusst, aufgrund der unterschiedlichen Materialverteilung, das Profil der Linie. Wird der

Druckpunkt Abstand zu groß, separieren sich einzelne Druckpunkte und kein einheitlicher Film entsteht. (Soltman & Subramanian, 2008)

Besitzt die Tinte UV-vernetzende Eigenschaften, kann die Zwangsbenetzung unterstützt und somit das Separieren der Druckpunkte durch das zügige Fixieren der Tinte eingeschränkt werden. Dieses Fixieren der UV-Tinte entsteht durch den Start der Vernetzungskinetik der Tinte mittels UV-Strahlung. Somit ist der Trocknungsvorgang ein Vernetzungsvorgang. Resch et al. zeigen in ihrer Untersuchung zur UV Aushärtung, dass mit einem höheren Abstand der UV-Quelle die Viskosität der Tinte später zunimmt und somit der Grad der Vernetzung längere Zeit benötigt. (Resch K. et al., 2008) Dieses kann die Oberflächenqualität des Drucks durch die mechanische Bewegung des Druckers verschlechtern, da die „Haut“ der nicht vollständig durchvernetzten Schicht auf noch flüssiger Tinte aufschwimmt und durch die mechanische Bewegung des Druckers gestaucht werden kann.

3.2.2 Einfluss des Substratmaterials

Die Filmbildung auf einem Kunststoffsubstrat setzt voraus, dass das Substrat benetzt wird. Diese Benetzung ist abhängig von der Oberflächenspannung der benetzenden Flüssigkeit und der vorherrschenden Oberflächenspannung des zu benetzenden Substrats. Young stellt diese Oberflächenspannungen in einen mathematischen Zusammenhang. Die Oberflächenspannung werden durch den Kontaktwinkel α_2 verknüpft. (Young, 1805) Diese Theorie basiert auf einer ebenmäßig glatten Substrattopographie. Zisman und Fowkes zeigen, dass die Benetzung stattfindet, sobald die Oberflächenspannung σ_{fg} der Flüssigkeit kleiner als die Oberflächenspannung σ_{sg} des Substrats ist. (Zisman & Fowkes, 1964) Liegt der Kontaktwinkel α_2 bei 0° wird das Substrat vollständig benetzt. Bis zu einem Kontaktwinkel α_2 von 90° liegt eine partielle Benetzung vor. Ist der Kontaktwinkel α_2 größer als 90° wird das Substrat nicht benetzt. Mit der Oberflächenspannung σ_{sf} zwischen Substrat und Flüssigkeit beschäftigt sich Fowkes. Er spaltet die Oberflächenspannung in einen dispersen und nicht-dispersen Anteil auf. (Fowkes, 1964) Rulison bringt die Benetzungstheorie von Zisman und Fowkes in die Praxis und führt in einem Applikationsreport auf, dass ein zu großer polarer Anteil in der Tinte die Haftung der Filmschicht verschlechtert. Er zeigt, dass diese Oberflächenpolarität die Adhäsionsenergie reduziert. Er führt auf, dass eine hohe Adhäsionsenergie, die sich aus dem polaren und dispersen Anteil der Flüssigkeit und des Substrats berechnen lässt, ein hoher Spreitkoeffizient und eine niedrige Oberflächenspannung σ_{sf} das Benetzungsverhalten beeinflussen. Rulison zeigt zudem, dass neben dem Benetzungsverhalten die langfristige Haftung einer Beschichtung durch eine hohe Adhäsionsenergie ebenfalls positiv beeinflusst wird. (Rulison, 2007) Connors und Banerjee stellen einen direkten Wertebezug der Oberflächenspannungen zur Filmbildung her. Sie arbeiten heraus, dass für eine gute Benetzbarkeit und somit eine gute Filmbildung, die

Oberflächenspannung σ_{tg} der Tinte circa 10 mN/m unter der Oberflächenspannung σ_{sg} des Substrats liegen sollte. (Conners & Banerjee, 1995) Dies ist besonders in Hinblick auf Kunststoff als Drucksubstrat schwierig, da Kunststoffe von Grund auf eine geringe Oberflächenspannung σ_{sg} besitzen. (Meichsner et al., 2016)

Alexander zeigt in seiner Forschungsarbeit auf, dass neben der geringen Oberflächenspannung σ_{sg} die niedrige elektrische Leitfähigkeit der Kunststoffe für erschwerte Beschichtungsbedingungen sorgt. Akkumulierte Ladung auf der Oberfläche reagiert auf den flüssigen Druckpunkt. Die weiterhin bestehende, unterschiedliche Ladungsverteilung auf der Kunststoffolie führt zu einem Ausweichen der flüssigen Tinte, wodurch der Druckpunkt von seiner halbkugelförmigen Soll-Form und seiner Soll-Positionierung abweicht. Dies beeinträchtigt die Druckbildqualität. (Alexander, 1971) Mielonen untersucht in ihrer Dissertation den Einfluss einer anionischen und kationischen Vorbehandlung auf die gedruckte Schicht. Sie zeigt, dass auf einer kathodischen Topographie ein Film erzeugt wird, der die Singularitäten des Papiers bedeckt. Bei genauerer Betrachtung ist dieser Film jedoch inhomogen verteilt. Die anionische Vorbehandlung bildet ebenfalls einen Film aus, der die Singularitäten bedeckt, jedoch wird die ursprüngliche Topographie des Papiers detaillierter abgebildet. Dieses wird in genauerer Betrachtung bestätigt. Die anionische Topographie ermöglicht einen homogenen Schichtdicke des Films, der zusätzlich die Topographie des Papiers versiegelt. (Mielonen K., 2015) Die Druckpunktdeformation, die aufgrund einer aufgeladenen Kunststoffoberfläche entstehen kann, wird mit Hilfe von, in den Druckprozess integrierten, Deionisierungseinheiten entgegengewirkt. Die Oberflächenspannung σ_{tg} muss bestmöglich auf die Oberflächenspannung σ_{sg} des Substrates angepasst werden, sodass eine Benetzung gegeben und eine größtmögliche Haftung des Films gewährleistet wird.

3.2.3 Einfluss der Substrattopographie

Die Substrattopographie entspricht der Oberflächenstruktur des Substrats, auf dem die Tinte aufgebracht wird. Die Natur bedient sich einer nanostrukturierten Substrattopographie, sodass Flüssigkeiten aufgrund des geringen Benetzungsverhaltens des Substrats, abperlen kann. Frenzel et al. zeigen, dass durch eine eigens hergestellte, mikroskopische Substrattopographie dieser natürliche superhydrophobe Effekt nachgestellt und die Benetzbarkeit gesteuert werden kann. So untersuchten sie die Möglichkeit, die Rauheit der Substrattopographie gezielt zu verändern, sodass die Flüssigkeiten von der Substrattopographie gerichtet abfließen kann. Sie erzeugen auf diese Weise eine künstliche, superhydrophobe Oberfläche, die die Benetzung reduziert. (Frenzel et al., 2010) Der Zusammenhang der Rauheit auf das Benetzungsverhalten wird in unterschiedlichen Modellen versucht zu erklären. Wenzel transferiert die Youngsche Gleichung (vgl. Gl. 2.1, Kap. 2.4) auf raue Oberflächen. Seine These geht davon aus, dass die Substrattopographie vollständig von der Flüssigkeit umfasst wird. Er zeigt, dass der reale Kontaktwinkel α_2 der rauen Oberfläche

sich von dem Kontaktwinkel α_2 einer ebenmäßig glatten Substrattopographie unterscheidet. Er erweiterte den Kontaktwinkel α_2 um den Rauheitsfaktor r_f , der den Quotienten aus tatsächlicher zur projizierten Oberfläche darstellt. Entspricht die projizierte Fläche der tatsächlichen Fläche, hat der Rauheitsfaktor r_f den Wert 1. Es wird ausschließlich die Youngsche Gleichung erfüllt. Ist hingegen die projizierte größer als die tatsächliche Fläche, wird der Rauheitsfaktor größer als 1. Die zugrundeliegende hydrophil bzw. hydrophob Benetzungseigenschaft wird zusätzlich verstärkt. (Wenzel, 1936) Das Model von Cassie und Baxter geht davon aus, dass sich zwischen der Substrattopographie und der Flüssigkeit Lufteinschlüsse bilden. Diese Lufteinschlüsse reduzieren den tatsächlichen Kontakt zwischen Substrat und Flüssigkeit. Schlussfolgernd muss die Gleichung um die tatsächlich benetzte Fläche ergänzt werden. (Cassie & Baxter, 1944) Shaker und Salahinejad reduzieren wieder die Erkenntnisse auf die Gleichung von Young. Sie erweitern die Parameter der Benetzbarkeit mit dem Parameter der normalisierten freien Oberflächenspannung (NSFE). Diese beschreibt den Kontaktwinkel zwischen einer Flüssigkeit und einer rauen Oberfläche. Dieser Parameter entspricht der Gleichung von Young mit dem Unterschied, dass sich der Kontaktwinkel aufgrund der rauen Topographie verändert. Der polare und disperse Anteil der freien Oberflächenspannung σ_{sg} des Substrates ändert sich aufgrund der Substrattopographie ebenfalls. Sie zeigen, dass die Gleichung von Young modifiziert auf raue Oberflächen angewendet werden kann. (Shaker & Salahinejad, 2018)

Neben dem Benetzungsverhalten führen die Poren einer rauen Topographie zu weiteren Effekten, die die Druckbildqualität des Inkjet-Drucks beeinflussen können. In seinem Buch beschreibt Hoath, dass der Tropfen mit einer definierten Geschwindigkeit auf das poröse Substrat gebracht wird. Der Aufprall bremst den Tropfen rapide ab, was einen hohen Druck zur Folge hat. Dieser Druck bewirkt eine Formveränderung des ehemals runden Tropfens und der Druckpunkt spreitet anfänglich. Die Tinte kann folgend partiell oder vollständig in das Substrat eindringen. Dieses Eindringen, auch Penetration genannt, verändert die Druckpunktform des noch bestehenden Druckpunktes. (Hoath, 2016) Qu et al. leiten ein mathematisches Modell her, das den Zusammenhang einer solchen Penetration und des Spreitens des Fluids auf einer Papieroberfläche beschreiben soll. Sie zeigen, dass das Eindringen der Tinte in das Substrat durch die Oberflächenspannungen gesteuert und mit dem Modell vorhergesagt werden kann. (Qu et al., 2011) Neben der Penetration ist das Spreitverhalten der Tinte auf rauem Untergrund entscheidend. Der ideale Druckpunkt ist halbkugelförmig. Spreitet der Tropfen unkontrolliert in verschiedene Richtungen, beeinflusst dies die Druckbildqualität. Savva und Kalliadasis stellen ein Modell auf, das das Fließverhalten einzelner Druckpunkte in Abhängigkeit der Rauheit erklärt. Sie zeigen, dass besonders im Stadium nahe dem Gleichgewicht die Dynamik des Tropfens abnimmt und die Substrattopographie den Tropfen stärker leitet. (Savva & Kalliadasis, 2010)

Die Inkjet-Technologie appliziert Tröpfchen in der Größenordnung von Pikoliter. Der Druckpunktdurchmesser liegt demzufolge im geringen Mikrometerbereich. Dieser Bereich unterschreitet die Rauheit der Substrattopographie von lasergesinterten Bauteilen, die im höheren Mikrometerbereich liegt. Die Filmbildung wird weniger von dem möglichen hydrophoben Verhalten eingeschränkt als vielmehr von dem ungleichmäßigen Film. Der ungleichmäßige Film entsteht durch die Täler der Substrattopographie, in denen Kapillarkräfte zu ungleichmäßig verteilten und deformierten Druckpunkte führen. Dies verändert das Druckbild. Krolle führt in seiner Dissertation mögliche Druckbildfehler auf. Die mikroskopischen Druckmuster können durch fehlende Druckpunkte „Missing-Dots“, Druckunruhen „Mottling“ und Ausbluten „Bleeding“ der Druckfarbe beeinträchtigt werden. (Krolle, 2014) Martorana et al. untersuchen die reduzierte Druckbildqualität aufgrund fehlender Druckpunkte im Tiefdruck. Sie zeigen, dass lokal keine Farbmischung oder fehlerhafte Farbmischungen entstehen, sobald einzelne Druckpunkte fehlen. Sie zeigen auf, dass vorhandene Krater auf der Substrattopographie Druckpunkte in den lokalen Tiefen verschwinden lassen. Dieses verursacht die fehlenden Druckpunkte. (Martorana et al., 2006) Klein et al. untersuchen den Einfluss eines fasrigen Substrates auf Druckunruhen im Offset-Druck. Fehlen keine Druckpunkte, aber laufen nebenstehende Druckpunkte ineinander, ist die Rede von Druckunruhen (engl.: Mottling). Dies führt lokal zu Farbmischungen, die einen unerwünschten Farbton bilden, was das Druckbildergebnis in der Farbwiedergabe verändert. (Klein et al., 2011) Fuchs et al. untersuchen in ihrem Forschungsprojekt die Farbwiedergabe des Druckbildes in Bezug auf Holz als Drucksubstrat. Sie zeigen, dass singuläre Fehlstellen in der Topographie eine ordentliche Positionierung der Druckpunkte verhindern. Dies beeinflusst die Druckbildqualität negativ. (Fuchs et al., 2013) Dies erklärt, wieso die Laufrichtung der Herstellung solcher Substrate eine große Rolle spielt. Die Fasern liegen in Laufrichtung gerichtet vor und das Druckmedium kann besser gedruckt werden. (Kalweit et al., 2012) Begünstigt wird das Verhalten durch Kapillarkräfte, die die Tinte aus der gleichmäßigen Halbkugelform ziehen. Diese Beeinträchtigung ist durch das Ausbluten (engl.: Bleeding) beschrieben. Eine mikroskopisch raue Topographie besitzt Täler, in die die Tinte durch die Kapillarkräfte gesogen wird.

3.3 Zielsetzung und Aufbau der Arbeit

Der Gestaltungsfreiheit einer Bauteilgeometrie ist durch das selektive Lasersintern kaum Grenzen gesetzt. Der visuelle Eindruck des Bauteils, das mit dem selektiven Lasersintern gefertigt wurde, ist durch das zumeist weiße Pulver jedoch limitiert. Zusätzlich besitzt das mit dieser Technologie gefertigte Bauteile eine charakteristische Substrattopographie, die auf die Stufenbildung aus unterschiedlichen Volumenelementen und die Rauheit aus anhaftenden Pulverkörnern an der Oberfläche zurückzuführen ist. Diese beeinflusst die haptische Wirkung des Bauteils negativ. Die Inkjet-Technologie kann der farblichen Limitierung durch das breite

Farbspektrum, das möglich ist, entgegenwirken. Der einmalige Druck verändert allerdings nicht signifikant die charakteristische Substrattopographie und somit wird die haptische Wirkung des Bauteils nicht maßgeblich verbessert. Zudem besitzt der gedruckte Film eine eigene Topographie, die aus der perlenförmigen Anordnung der einzelnen Druckpunkte resultiert.

Aus diesem Stand der Technik entsteht die wissenschaftliche Fragestellung, wie sich das mehrfache Bedrucken mit der Inkjet-Technologie auf die Topographie von lasergesinterten Bauteilen auswirkt.

Ausgehend von der wissenschaftlichen Fragestellung ergibt sich die **erste Hypothese**, dass die Rauheitsreduktion von lasergesinterten Substrattopographien mittels mehrlagigen Inkjet-Drucks mit Hilfe eines **mathematischen Modells** beschrieben werden kann. Diese Hypothese erschließt sich aus der Gegebenheit, dass der einmalige Druck die charakteristische Substrattopographie zwar nicht signifikant, aber dennoch verändert. Diese Veränderung basiert auf dem Fließverhalten der Tinte und kann mit einem mathematischen Modell beschrieben werden.

Ausgehend von dieser Hypothese ergibt sich die **zweite Hypothese**, dass sich die einzelnen **Einflussgrößen** aus dem mathematischen Modell unterschiedlich auf den Glättungsverlauf auswirken. Diese Hypothese basiert auf der Annahme, dass das Fließverhalten der Tinte durch Einflussgrößen wie beispielsweise der Nivellierungszeit oder der applizierten Schichtdicke beeinflusst werden kann.

Der visuelle Eindruck und die haptische Wirkung des bedruckten Resultats sind subjektive Wahrnehmungen, die schwer gemessen werden können. Basierend auf dieser Tatsache ergibt sich die **dritte Hypothese**, dass die subjektive Wahrnehmung aus der Rauheitsreduktion mit Hilfe von **objektiven Rauheitskenngrößen** beschrieben werden kann. Diese Hypothese ergibt sich aus der Überlegung, dass die subjektive Wahrnehmung mitunter ein Resultat aus der Substrattopographie ist, die mit Hilfe von Rauheitskenngrößen charakterisiert werden kann.

Die aus dem Stand der Technik abgeleitete Fragestellung und die aufgestellten Hypothesen werden in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

Das **Kapitel 1** vermittelt in der vorliegenden Arbeit die Motivation, die zu der wissenschaftlichen Arbeit führt. Diese basiert auf einer erweiterten Möglichkeit der Personalisierung des Automobils durch die Kombination aus dem selektiven Lasersintern und der Inkjet-Technologie.

In **Kapitel 2** werden die Grundlagen zu den Verfahrensprinzipien dieser beiden Technologien vermittelt. Zusätzlich beinhaltet dieses Kapitel die theoretische Grundlage der Filmbildung, die für den weiteren Verlauf der Modellbildung essentiell ist.

Das **Kapitel 3** befasst sich mit der Oberflächenqualität, die aus den Verfahrensprinzipien der Technologien resultiert. Hierbei liegt zum einen der Fokus auf der Oberflächenqualität aus dem Verfahren des selektiven Lasersinterns, welche durch den Fertigungsprozess und dem verwendeten Material beeinflusst wird. Zum anderen liegt der Fokus auf den Einflussgrößen der Oberflächenqualität auf den Inkjet-Druck. Hierbei wird zunächst die grundlegende Topographie des mit Inkjet gedruckten Films dargelegt und im Anschluss der Einfluss des Substratmaterials und der -topographie auf diesen Film vorgestellt. Zur Beschreibung der Substrattopographie werden die Rauheitskenngrößen erläutert. Dieses Kapitel bildet den Stand der Technik.

In **Kapitel 4** wird das experimentelle Set-Up bestehend aus Materialien und Equipment beschrieben.

Unter Berücksichtigung, dass eine Filmbildung auf dem polyamidbasierten (PA12) Substrat stattfindet, wird in **Kapitel 5** zunächst ein theoretisches Modell der Glättung hergeleitet, das den Glättungsverlauf Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n beschreibt. Die Modellvorstellung der Topographieveränderung soll den Glättungsverlauf Sa_n und den Glättungsfortschritt ΔSa_n zwischen zwei aufeinanderfolgenden Druckdurchgängen vorhersagen. Aus der Modellvorstellung wird die mathematische Beschreibung abgeleitet, die das Fließverhalten der Tinte beschreibt. In diesem Zusammenhang werden die Einflussgrößen auf das Fließverhalten herausgearbeitet und spezifiziert. Zusätzlich wird ein Modell der partiellen Materialverteilung entwickelt, das die Schichtdicken auf den lokal vorhandenen Maxima und Minima der lasergesinterten Substrattopographie beschreibt. Anhand von definierten Substrattopographien, die periodisch angeordnete Strukturelemente in Form einer gefrästen Zahnstruktur besitzen, werden die Modelle verifiziert und die Validität der Modelle überprüft und festgelegt.

In **Kapitel 6** wird das Glättungsverhalten unter den verschiedenen Einflussgrößen untersucht und mit dem Modell abgeglichen. Im ersten Zug wird die lasergesinterte Substrattopographie wsls verändert. Dies dient einer konkreten Aussage über den Glättungsverlauf Sa_n der Substrattopographie durch den mehrlagigen Inkjet-Druck. Der Einfluss der Substrattopographie wird durch die definierte Zahnstruktur analysiert, deren Öffnungswinkel α_{open} variiert. Aufgedruckt wird eine flächige Schicht mittels Inkjet. Die Nivellierungszeit t_N und die Schichtdicken werden im nächsten Druckdurchgang auf einer definierten Substrattopographie variiert und die Veränderung des Glättungsverlaufs mit zunehmendem Druckdurchgang n herausgearbeitet. Als letztes wird der flächige Druck in das selektive Bedrucken verändert und in das in Kapitel 5 entwickelte Modell eingeordnet. Dieses repräsentiert das Glätten durch Positionierung der Tinte direkt in die zu füllenden Täler der Substrattopographie bei geringer Nivellierungszeit t_N .

In **Kapitel 7** wird das Ergebnis der Glättungsversuche anhand von objektiven Parametern zur Beschreibung der Druckbildqualität analysiert. Für die Bewertung des Glättungserfolgs werden Parameter herausgearbeitet, die eine objektive Beurteilung des visuellen Eindrucks ermöglichen. Hierzu werden im ersten Schritt Parameter herausgearbeitet, die den visuellen Eindruck in Abhängigkeit der Topographie transportieren. Mittels dieser Parameter werden die Ergebnisse der Glättungsversuche verglichen und eingeordnet.

Das **Kapitel 8** fasst die Erkenntnisse dieser Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick in weiteres Forschungspotential.

4 Experimentelle Konfiguration (Set-Up)

Die Versuche zur Verifizierung des Modells umfasst eine Vielzahl an Untersuchungen. Für diese Untersuchungen werden verschiedene Materialien, wie das Substrat und die Tinte, verschiedene Geräte, wie dem Inkjet-Drucker und der Konfokalmikroskopie, sowie unterschiedliche Analysemethoden verwendet. In den folgenden Kapiteln werden diese erläutert. Zusätzlich bildet die Übersicht, der in den Folgekapiteln verwendeten Versuchsreihen, einen Überblick der Parameter für die Untersuchungen.

4.1 Materialien

Die verwendeten Materialien untergliedern sich in das Substrat und die Tinte. Das Substrat beschreibt das Bauteil, auf welches der Druck erfolgt. Die Tinte wird auf das Substrat gedruckt.

4.1.1 Substrat

Zur Analyse der pulverbedingten Mikrostruktur dienen als Basis der Untersuchungen lasergesinterte Platten aus PA2200 der Firma EOS GmbH (Krailing). Dieses Material entspricht dem Kunststoff Polyamid 12. Die Platten wurden an der Lasersinteranlage EOS P 760 der Firma EOS GmbH (Krailing) mit einer Schichtdicke h_s von 100 μm hergestellt und besitzen das Format DIN A6 mit einer Bauteildicke von 4 mm. Diese Platten wurden im Bauraum der Laser-Sinteranlage stehend im Winkel θ_{SLS} von 90° zur Bauplattform gefertigt, Abb. 4-1. Die unbehandelten, lasergesinterten Platten besitzen eine undefinierte Substrattopographie.

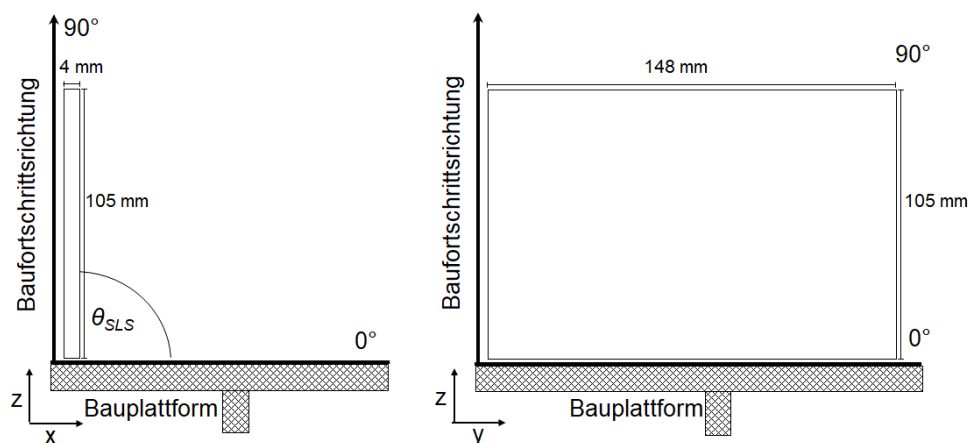


Abbildung 4-1: Aufbau der lasergesinterten Musterplatten als Versuchgrundlage für die Untersuchung des Glättungsverlaufs San . Die Platten werden 90° stehend zur Bauplattform in Baufortschrittsrichtung gefertigt.

Neben der undefinierten Substrattopographie wurden Platten stehend im Winkel θ_{SLS} von 90° zur Bauplattform gefertigt und anschließend die undefinierte Substrattopographie durch Fräsen in gerichtete, achsensymmetrische Zahnstrukturen überführt, Abb. 4-2. Die Strukturelemente der Zahnstruktur dieser definierten Substrattopographien unterscheiden sich

in deren Öffnungswinkel α_{open} . Die Substrattopographie W100 besitzt einen theoretischen Öffnungswinkel α_{open} von 100° , die Substrattopographie W120 hat einen theoretischen Öffnungswinkel α_{open} von 120° und die Substrattopographie W135 weist einen theoretischen Öffnungswinkel α_{open} von 135° auf. Die Rauheit Rz des Profilschnitts der definierten Substrattopographie WsIs umfasst circa $100\ \mu\text{m}$. Dies entspricht der Rauheit Rz einer undefinierten Substrattopographie direkt nach dem Lasersintern. Die Zahnstruktur verläuft entlang der y-Achse und gibt die Möglichkeit, die freien Volumina V_{frei} einer Mulde mit einer definierten Breite b und die Materialverteilungen zu ermitteln. Da die definierte Substrattopographie aus der lasergesinterten Musterplatte gefräst wird, bleibt das Basismaterial unverändert dem des lasergesinterten PA12s. So soll der Einfluss unterschiedlicher Oberflächenspannungen, die auf unterschiedliche Materialien zurückzuführen sind, ausgeschlossen werden. Zudem werden mit den periodisch angeordneten Strukturelementen der definierten Substrattopographie aus dem Fräsvorgang Hinterschneidungen vermieden, die mit dem Konfokalmikroskop, aufgrund des negativen Neigungswinkel β_{tilt} , nicht erfasst werden können.

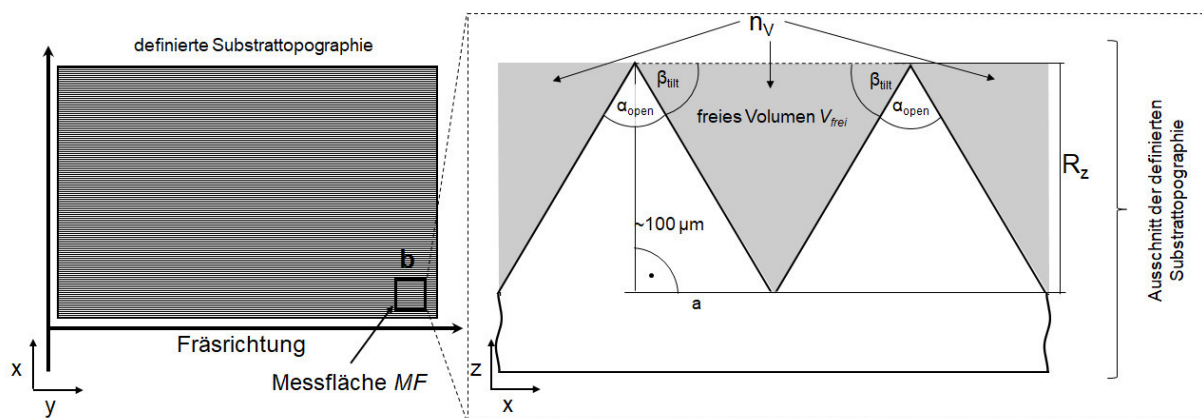


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der periodisch angeordneten Strukturelemente in Form einer Zahnstruktur der definierten Substrattopographie durch die achsensymmetrische Zahnstruktur nach dem Fräsvorgang.

Der theoretisch vorgegebene Öffnungswinkel α_{open} wird mittels der Trigonometrie mit

$$\alpha_{open} = 2 \cdot \arctan\left(\frac{Rz}{a}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (4.1)$$

mit:

α_{open}	Öffnungswinkel eines Zahnes der Substrattopographie,
Rz	Rauheit,
a	halbe Basislänge eines Zahnes der Substrattopographie

überprüft und der entsprechende Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken, ausgehend von der x-Achse, mit

$$\beta_{tilt} = 90^\circ - \left(\frac{1}{2} \cdot \alpha_{open}\right) = 90^\circ - \arctan\left(\frac{Rz}{a}\right) \cdot \frac{180^\circ}{\pi} \quad (4.2)$$

mit:

β_{tilt}	Neigungswinkel einer Zahnflanke der Substrattopographie,
α_{open}	Öffnungswinkel eines Zahnes der Substrattopographie,
Rz	Rauheit,
a	halbe Basislänge eines Zahnes der Substrattopographie

berechnet.

Das freie Volumen $V_{frei,MF}$ mit Bezug auf die Messfläche MF kann mittels

$$V_{frei,MF} = 2 \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot Rz \cdot a\right) \cdot b \cdot n_V = Rz \cdot a \cdot b \cdot n_V \quad (4.3)$$

mit:

$V_{frei,MF}$	freie Volumen einer definierten Messfläche in mm ³ ,
Rz	Rauheit,
a	halbe Basislänge eines Zahnes der Substrattopographie,
b	Länge der Messfläche senkrecht zur Zahnstruktur,
n_V	Anzahl der freien Volumina in einer Messfläche

berechnet werden. Es setzt sich aus der zu füllenden Fläche des freien Dreiecks zusammen, das sich auf die Breite b der Messfläche MF ausdehnt. Da die Messfläche eine definierte Anzahl an diesen freien Volumen besitzt, wird das freie Volumen eines Dreiecks mit der Anzahl der Zähne innerhalb der Messfläche multipliziert.

4.1.2 Tinte

Die Druckeigenschaften der Tinte sind auf die Druckparameter des verwendeten Druckers abgestimmt. Hierdurch wird die Zusammenarbeit zwischen der integrierten UV-Einheit des Druckers und der Vernetzung der Tinte sichergestellt.

Die Glättversuche wurden mit der Tinte UV Ink LH-100 White der Firma Mimaki Europe B.V. (Amsterdam, Niederlande) durchgeführt. Die Tinte besteht aus einem Gemisch auf Acrylatbasis und enthält Titandioxid (CAS: 13463-67-7) als Pigment in einer Konzentration c von 10 bis 15 wt %. (Mimaki Engineering Co., 2012) Die Dichte ρ dieser Tinte liegt bei 1,09 g/m³ und deren Viskosität η entspricht einem Wert von 22 mPas bei 25 °C. Die vermessene Oberflächenspannung σ der Tinte beträgt 34,46 mN/m. Diese Tinte ist UV-vernetzend bei einer Wellenlänge λ_{UV} von circa 385 nm. Die aufgebrachte, mittlere Schichtdicke h wird mit Hilfe des Druckbilds variiert. Die höchste mittlere Schichtdicke h des Drucks wird unter Verwendung der weißen Tinte und unter Berücksichtigung eines schwarzen Druckbildes erreicht. Ein geringerer prozentualer Anteil an Schwarz reduziert die gewünschte, mittlere Schichtdicke h . Die mittlere Schichtdicke h ist, neben dem Druckbild, abhängig von der verwendeten Druckauflösung. Diese liegt in dieser Arbeit konstant bei 600 x 600 dpi.

Die Tinte ist nach dem Druckvorgang transluzent, wodurch die Farbe des Druckbildergebnisses abhängig von der Untergrundfärbung ist.

4.2 Equipment

Der Glättungsprozess und die Topographie der Tinte ist abhängig von dem verwendeten Drucker, der eine auf die Tinte abgestimmte Waveform besitzt. Diese Waveform steuert das Volumen und den Zeitpunkt der Abgabe des Tintentröpfchens aus der Düse und wird von dem Hersteller vorgegeben. Mit Hilfe der Konfokalmikroskopie wird analysiert, wie sich die Topographien durch die unterschiedlichen Oberflächenpräparationen unterscheiden. Die daraus resultierenden Oberflächenparameter geben die Möglichkeit, die Topographie mit der Druckbildqualität zu korrelieren.

4.2.1 Inkjet-Drucker für den Beschichtungsprozess

Die Druckversuche werden an dem Industriedrucker UJF-7151plus der Firma Mimaki Europe B.V. (Amsterdam, Niederlande) durchgeführt. Hierfür wird die Platte mit einer Auflösung von 600 x 600 dpi und 8 Pass mehrmals flächig mit weißer Tinte des Produkts UV Ink LH-100 White der Firma Mimaki Europe B.V. (Amsterdam, Niederlande) bedruckt.

Da es sich um eine UV-vernetzende Tinte handelt, erfolgt die Vernetzung standardmäßig nach circa 6 Millisekunden durch eine am Schlitten integrierte UV-Einheit. Diese UV-Einheit besteht aus zwei Reihen LED Lämpchen. Die Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden ist eine gerätespezifische Einstellung, die ein unkontrolliertes Fließen durch das direkte Fixieren der Tintentropfen verhindert und auf den ebenmäßigen visuellen Eindruck des Druckbildes angepasst wurde.

Diese Einstellungen erzeugen einen Farbauftrag mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm bei 100 % K-Anteil. Die mittlere Schichtdicke h von 12 μm bzw. 10 μm wird mittels eines prozentualen Anteils an Schwarz von 90 % bzw. 80 % erzeugt.

4.2.2 Konfokalmikroskop zur Topographieanalyse

Mit der Konfokalmikroskopie kann die Substrattopographie von lasergesinterten Bauteilen flächenbezogen gut visualisiert werden. Mögliche Defekte aus einer Kontaktmessung, wie es bei einem taktile Tastschnittverfahren der Fall ist, werden verhindert, da die Substrattopographie mittels Lichtreflexion aufgenommen werden und dadurch keine Berührung stattfindet. Dieses Verfahren bietet jedoch den Nachteil, dass es Hinterschneidungen nicht aufnehmen kann. (Launhardt et al., 2016) Da in dieser Arbeit vergleichende Untersuchungen durchgeführt werden, ist diese Form der Messtechnik für die Untersuchungen dennoch geeignet.

Die unterschiedlichen Topographien werden mittels dem 3D-Konfokalmikroskop $\mu\text{s}urf\ custom$ der Firma Nanofocus AG (Oberkochen) untersucht. Die Einzelmessfläche liegt bei 800 μm x 800 μm und umfasst insgesamt 16 Einzelmessflächen aufgeteilt auf ein Quadrat aus vier Einzelmessflächen mal vier Einzelmessflächen, Abb. 4-3.

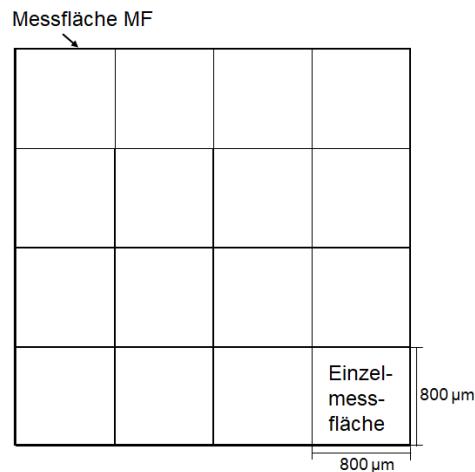


Abbildung 4-3: Darstellung der Messfläche MF basierend auf 16 Einzelmessfläche mit der Größe $800\ \mu\text{m} \times 800\ \mu\text{m}$.

Daraus ergibt sich eine gesamte Messfläche MF von circa $3 \times 3\ \text{mm}^2$. Das verwendete Objektiv 800XS besitzt eine 20-fache Vergrößerung und dessen numerische Apertur liegt bei 0,6. Das Objektiv nimmt einen theoretischen Grenzwinkel von 37° auf, ist jedoch abhängig von dem Material und der Topographie des Substrates. Aufgrund der rauen Oberfläche kommt es zu diffusen Reflektionen, die wesentlich größere Grenzwinkel abbilden lassen.

Die Messergebnisse werden durch die Messung der Topographien an fünf verschiedenen Stellen verifiziert und aus den fünf erhaltenen Messwerten der Mittelwert mit dessen Standardabweichung berechnet.

4.3 Analysemethoden

Der Einfluss der Substrattopographie auf die Druckbildqualität wird mittels der subjektiven Bewertung des visuellen Eindrucks eines Druckbildes, der Wertigkeit, vorgenommen. Diese Wertigkeit wird in Korrelation mit den objektiven Rauheitskenngrößen gesetzt, sodass eine personenneutrale Bewertung der Druckbildqualität gewährleistet werden kann. Zudem bestimmen die Rauheitskenngrößen die Abnahme der Rauheit der Substrattopographie durch den mehrlagigen Inkjet-Druck. Beide Analysemethoden, die subjektive Wertigkeit wie die objektiven Rauheitskenngrößen, werden in diesem Kapitel näher erläutert.

4.3.1 Qualifizierung der Druckbildqualität mittels der Wertigkeit

Zur Analyse der Druckbildqualität wird das, auf den unterschiedlich präparierten Oberflächen applizierte Druckbild, unter dem Mikroskop untersucht. Zur Untersuchung wird das Digitalmikroskop Smartzoom 5 der Firma Carl Zeiss Microscopy GmbH (Jena) eingesetzt. Um die Druckbildqualität mit den Messergebnissen zu korrelieren, wird eine Einstufung in subjektive Wertigkeiten von „ungenügend“, „ausreichend“, „befriedigend“ und „gut“ vorgenommen. Für eine bessere Visualisierung dieser Wertigkeiten werden zusätzlich die Kennziffern 4 bis 1 eingeführt. Das visuell beste Ergebnis aus dem Vergleich der vier

Druckbildqualitäten erhielt die Wertigkeit „gut“. Dies entspricht der Kennziffer 1. Mit abnehmender Druckbildqualität wurde die Wertigkeit „befriedigend“ (Kennziffer 2), „ausreichend“ (Kennziffer 3) bzw. „ungenügend“ (Kennziffer 4) vergeben. Demgegenüber stehen die Rauheitskenngrößen aus den Messergebnissen, deren Kennziffern sich nach dem erwarteten Einfluss auf die Qualität richtet. Hierbei wurde der auf die Druckbildqualität geringste Einfluss der Rauheitskenngröße mit der Kennziffer 1 versehen. Mit zunehmendem, negativem Einfluss wurden die Kennziffern 2, 3 bzw. 4 vergeben.

4.3.2 Qualifizierung der Topographie mittels der Rauheitskenngrößen

Die in dieser Arbeit verwendeten Rauheitskenngrößen basieren auf der geometrischen Produktspezifikation der DIN EN ISO 25178-2:2012 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2012) (vgl. Kap. 3.3).

Aufgrund der Komplexität der Topographien wird auf die dreidimensionale „Surface S“ Kenngrößen zurückgegriffen, die sich auf die gesamte Messfläche anstelle auf einzelne Profile aus der gesamten Messfläche bezieht. Die Kenngrößen werden aus jeweils fünf Messpunkten *MP* mit Hilfe des Auswerteprogramms Mountainsmap der Firma Digital Surf (Besançon, France) berechnet und aus den fünf berechneten Kenngrößen der Mittelwert und die dazugehörige Standardabweichung berechnet.

Die arithmetische Mittenrauheit S_a ist unempfindlich gegenüber Ausreißern und wird für die Analyse des Glättungsverlaufs S_{a_n} und des Glättungsfortschritts ΔS_{a_n} herangezogen. Die arithmetische Mittenrauheit S_a wird aus einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$, die von dem 3D-Konfokalmikroskop $\mu\text{surf custom}$ der Firma Nanofocus AG (Oberkochen) aufgenommen wurde, ausgegeben.

Die Druckbildqualität ist abhängig von der Topographie. Da diese durch die Kenngröße S_a nicht ausreichend beschrieben wird, werden die flächenbezogenen Kenngrößen Kernrauheit S_k , reduzierte Spitzenhöhe S_{pk} und reduzierte Riefentiefe S_{vk} zur Beschreibung der visuellen Wirkung herangezogen. Die Kenngrößen werden ebenfalls aus jeweils fünf Messpunkten *MP* mit Hilfe des Auswerteprogramms Mountainsmap berechnet und aus den fünf berechneten Kenngrößen der Mittelwert und die dazugehörige Standardabweichung gebildet. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Kenngrößen werden die Verhältnisse S_{vk}/S_{pk} , S_{vk}/S_k und S_{pk}/S_k gebildet. Zur Bildung der Verhältnisse S_{vk}/S_{pk} , S_{vk}/S_k und S_{pk}/S_k werden die einzelnen Kenngrößen eines Messpunktes ins Verhältnis gesetzt. Der Mittelwert und die Standardabweichung bilden sich aus den Verhältnissen der fünf Messpunkte.

Mittels dieser Verhältnisse wird ein vergleichbares Ergebnis erzielt und für die objektive Parametrisierung der visuellen Wirkung herangezogen.

4.4 Übersicht Versuchsreihen

Die Versuchsreihen werden durch Grundeinstellungen aufgebaut, die mit versuchsspezifischen Einstellungen der jeweiligen Versuche kombiniert werden. Diese Einstellungen besitzen festgelegte Materialien, Druckeinstellungen, Parameter und Messvorschriften.

4.4.1 Vorgehen der Kontaktwinkelmessung

Für die Kontaktwinkelmessung in Abhängigkeit der Zeit wird eine mit Inkjet geglättete Substrattopographie W120 (vgl. Kap. 4.1.1) verwendet. Als Materialbasis des Versuchs KW_1 dient die Tinte LH-100 White, die flächig auf die Substrattopographie gedruckt wird. Die Tinte wird mit 8 Pass bei einer Druckerauflösung von 600 x 600 dpi aufgedruckt. Die definierte Substrattopographie W120 wird mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden innerhalb von zehn Druckdurchgängen mit einer aufgedruckten, mittleren Schichtdicke h von 15 μm geglättet. Diese mit Inkjet geglättete, neue Substrattopographie wird W_{IG10} genannt. Auf der vorgeglätteten Substrattopographie W_{IG10} wird mit Hilfe einer Pipette ein definiertes Tintenvolumen V_{Tinte} der Tinte LH-100 White von 120 μl aufgebracht und der Kontaktwinkel α_2 mit zunehmender Nivellierungszeit t_N untersucht.

4.4.2 Grundeinstellung

Als Materialbasis der Versuchsreihen dient die Tinte LH-100 White. Die Tinte wird mit jedem Druckdurchgang n mit 8 Pass bei einer Druckerauflösung von 600 x 600 dpi auf die Substrattopographie aufgedruckt. Die Messvorschrift für die Topographiemessung umfasst die Messfläche und die Messpunkanzahl. Die Topographiemessung wird an fünf frei definierten Messpunkten nach den Parametern aus Kapitel 4.2.2 durchgeführt. Die mit der Messung der unbedruckten Substrattopographie festgelegten Messpunktkoordinaten werden nach jedem Druckdurchgang n erneut angefahren und aufgenommen, sodass Unterschiede in der Topographie den Glättungsfortschritt ΔSa_n nicht beeinflussen können.

4.4.3 Versuchsspezifische Einstellungen

Die versuchsspezifischen Einstellungen für die Verifizierung des theoretischen Modells der Glättung und der Analyse der Einflussgrößen Substrattopographie, Nivellierungszeit, Schichtdicke und Auftragsform werden im Folgenden erläutert.

4.4.3.1 Spezifische Einstellungen der Versuchsreihe Modellierung

Die Tinte wird auf die definierte Substrattopographie W120 (vgl. Kap. 4.1.1) aufgedruckt. Die mittlere Schichtdicke h der Tinte liegt bei 15 μm und wurde durch die Messung des Abstandes einer auf Folie gedruckten Schicht zur unbedruckten Folie mit dem 3D-Konfokalmikroskop $\mu\text{surf custom}$ der Firma Nanofocus AG (Oberkochen) bestimmt. Der Versuch MOD_1.1 wird mit einer Nivellierungszeiten t_N von 6 Millisekunden und der Versuch MOD_1.2 mit einer Nivellierungszeiten t_N von 60 Sekunden durchgeführt. Die Nivellierungszeit t_N von 6

Millisekunde ist eine gerätespezifische Einstellung, die für ein optimales Druckbildergebnis ausgelegt ist. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden ausreicht, einen ebenmäßig glatten Tintenfilm, ohne die charakteristische Tintentopographie zu erreichen. Insgesamt erfolgen 15 Druckdurchgänge bei dem Versuch MOD_1.1 und zwölf Druckdurchgänge bei dem Versuch MOD_1.2, Tab. 4-1. Nach jeder Schicht wird die Topographie an den vorher definierten Messpunkten vermessen.

Tabelle 4-1: Versuchsdurchführung zur Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Glättungsverlaufs Sa_n .

Bezeichnung		MOD_1.1	MOD_1.2
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12
Druckeinstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8
	Substrattopographie	W120	W120
	Auftragsform	Flächig	Flächig
Parameter	Mittlere Schichtdicke h in μm	15	15
	Nivellierungszeit t_N in s	0,006	60
	Anzahl Druckdurchgänge n	15	12
	Anzahl Messpunkte MP	5	5
Messvorschrift	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3

Mit der Versuchsreihe, bestehend aus den Versuchen MOD_2.1 und MOD_2.2, wird die Tintentopographie identifiziert, Tab.4-2. Die definierte Substrattopographie W120 wird mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden innerhalb von zehn Druckdurchgängen mit einer aufgedruckten, mittleren Schichtdicke h von 15 μm geglättet. Diese mit Inkjet geglättete, neue Substrattopographie wird W_{IG10} genannt. Auf die geglättete Substrattopographie W_{IG10} wird in dem Versuch MOD_2.1 eine Schicht mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden aufgebracht und vernetzt. Im Anschluss wird die Tintentopographie vermessen und der Rauheitswert ermittelt. Der Vorgang des Versuchs MOD_2.2 gleicht dem Vorgang des Versuchs MOD_2.1 mit dem Unterschied, dass die Nivellierungszeit t_N bei 60 Sekunden liegt.

Tabelle 4-2: Versuchsdurchführung zur Verifizierung des Modells der Glättung anhand der Tintentopographie (EST).

Bezeichnung		MOD_2.1	MOD_2.2
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8
Parameter	Substrattopographie	W_{IG10}	W_{IG10}
	Auftragsform	Flächig	Flächig
	Mittlere Schichtdicke h in μm	15	15
	Nivellierungszeit t_N in s	0,006	60
	Anzahl Druckdurchgänge n	1	1
Mess-vorschrift	Anzahl Messpunkte MP	5	5
	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3

4.4.3.2 Spezifische Einstellungen der Versuchsreihe Substrattopographie

Die Tinte wird flächig auf die definierte Substrattopographie aufgedruckt. Die mittlere Schichtdicke h der Tinte liegt bei 15 μm und wurde durch die Messung des Abstandes einer auf Folie gedruckten Schicht zur unbedruckten Folie mit dem Konfokalmikroskop bestimmt. Die Schichtdicke der Versuche US_1.1 bis US_1.4 wird nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden vernetzt, Tab. 4-3. Insgesamt erfolgen 15 Druckdurchgänge, wodurch eine Schichtanzahl von 15 Schichten auf der Platte am Ende der Versuche vorliegt. Nach jeder einzelnen Schicht wird die Topographie vermessen.

Der Versuch US_1.1 wird an der unbehandelten, lasergesinterten Substrattopographie Wsls durchgeführt. Diese Substrattopographie besitzt stochastisch verteilte Strukturelemente. Der Versuch US_1.2 besitzt eine definierte Substrattopographie W100 mit einem Öffnungswinkel α_{open} von 100° der periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur. Die Substrattopographie W120 besitzt einen Öffnungswinkel α_{open} von 120° der periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur und wird im Versuch US_1.3 eingesetzt. In dem Versuch US_1.4 wird die Substrattopographie W135 verwendet. Diese besitzt einen Öffnungswinkel α_{open} von 135° der periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur. ¹

¹ Der Versuch US_1.1 wurde von Monisha Yoganathan und die Versuche US_1.2 bis US_1.4 wurden von Berna Pehlivan ausgeführt und die Rohdaten für eine weitere Auswertung in dieser Arbeit herangezogen [vgl. Yoganathan (2017), Pehlivan (2018)].

Tabelle 4-3: Versuchsdurchführung zur Analyse des Einflusses der Substrattopographie auf den Glättungsverlauf Sa_n bei einer geringen Nivellierungszeit t_N .

Bezeichnung		US_1.1	US_1.2	US_1.3	US_1.4
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8	8	8
Parameter	Substrattopographie	Wsls	W100	W120	W135
	Auftragsform	Flächig	Flächig	Flächig	Flächig
	Mittlere Schichtdicke h in μm	15	15	15	15
	Nivellierungszeit t_N in s	0,006	0,006	0,006	0,006
	Anzahl Druckdurchgänge n	15	15	15	15
Mess-vorschrift	Anzahl Messpunkte MP	5	5	5	5
	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3

Die Schichtdicke der Versuche US_2.1 bis US_2.4 wird nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden vernetzt, Tab. 4-4. Insgesamt erfolgen zwölf Druckdurchgänge, wodurch eine Schichtanzahl von zwölf Schichten auf der Platte am Ende der Versuche vorliegt. Nach jeder einzelnen Schicht wird die Topographie vermessen.

Der Versuch US_2.1 wird an der unbehandelten, lasergesinterten Substrattopographie Wsls durchgeführt. Diese Substrattopographie besitzt stochastisch verteilte Strukturelemente und wurde nicht nachträglich geätzt, Tab. 4-4.

Tabelle 4-4: Versuchsdurchführung zur Analyse des Einflusses der Substrattopographie auf den Glättungsverlauf Sa_n bei einer großen Nivellierungszeit t_N .

Bezeichnung		US_2.1	US_2.2	US_2.3	US_2.4
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8	8	8
Parameter	Substrattopographie	Wsls	W100	W120	W135
	Auftragsform	Flächig	Flächig	Flächig	Flächig
	Mittlere Schichtdicke h in μm	15	15	15	15
	Nivellierungszeit t_N in s	60	60	60	60
	Anzahl Druckdurchgänge n	12	12	12	12
Mess-vorschrift	Anzahl Messpunkte MP	5	5	5	5
	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3

Der Versuch US_2.2 besitzt eine definierte Substrattopographie W100 mit einem Öffnungswinkel α_{open} von 100° der periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur. Die Substrattopographie W120 besitzt einen Öffnungswinkel α_{open} von 120° der periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur und wird in dem Versuch US_2.3

eingesetzt. In dem Versuch US_2.4 wird die Substrattopographie W135 verwendet. Diese besitzt einen Öffnungswinkel α_{open} von 135° der periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur.²

4.4.3.3 Spezifische Einstellungen der Versuchsreihe Nivellierungszeit

Die Tinte wird flächig auf die definierte Substrattopographie W120 aufgedruckt. Die mittlere Schichtdicke h der Tinte liegt bei $15\text{ }\mu\text{m}$ und wurde durch die Messung des Abstandes einer auf Folie gedruckten Schicht zur unbedruckten Folie mit dem 3D-Konfokalmikroskop μsurf custom der Firma Nanofocus AG (Oberkochen) bestimmt.

Bei dem Versuch NIV_1.1 erfolgen insgesamt 15 Druckdurchgänge bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden, wodurch am Ende des Versuchs eine Schichtanzahl von 15 Schichten auf der Platte vorliegt, Tab.4-5. Der Versuch NIV_1.2 umfasst eine Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden. Die Anzahl der Druckdurchgänge n wird auf zwölf reduziert. Die Nivellierungszeit t_N von 40 Sekunden wird in dem Versuch NIV_1.3 untersucht. Hierbei werden ebenfalls zwölf Druckdurchgänge realisiert. Der Versuch NIV_1.4 wird mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden durchgeführt. Die Anzahl der Druckdurchgänge n liegt bei zwölf, Tab.4-5. Nach jeder einzelnen Schicht wird die Topographie vermessen.³

Tabelle 4-5: Versuchsdurchführung zur Analyse des Einflusses der Nivellierungszeit t_N auf den Glättungsverlauf Sa_n bei einer definierten Substrattopographie W120.

Bezeichnung		NIV_1.1	NIV_1.2	NIV_1.3	NIV_1.4
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8	8	8
	Substrattopographie	W120	W120	W120	W120
	Auftragsform	Flächig	Flächig	Flächig	Flächig
Parameter	Mittlere Schichtdicke h in μm	15	15	15	15
	Nivellierungszeit t_N in s	0,006	20	40	60
	Anzahl Druckdurchgänge n	15	12	12	12
	Anzahl Messpunkte MP	5	5	5	5
Mess-vorschrift	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3

Die Versuchsreihe bestehend aus den Versuchen NIV_2.1 bis NIV_2.7, dient der Identifizierung der Tintentopographie, Tab.4-6. Die definierte Substrattopographie W120 wird

² Der Versuch US_2.1 wurde von Monisha Yoganathan und die Versuche US_2.2 bis US_2.4 wurden von Berna Pehlivan ausgeführt und die Rohdaten für eine weitere Auswertung in dieser Arbeit herangezogen [vgl. Yoganathan (2017), Pehlivan (2018)].

³ Die Versuche NIV_1.2 bis NIV_1.4 wurden von Berna Pehlivan ausgeführt und die Rohdaten für eine weitere Auswertung in dieser Arbeit herangezogen [vgl. Pehlivan (2018)].

mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden innerhalb von zehn Druckdurchgängen mit einer aufgedruckten, mittleren Schichtdicke h von 15 μm geglättet. Diese mit Inkjet geglättete, neue Substratopographie wird W_{IG10} genannt. Auf die geglättete Substratopographie W_{IG10} wird bei dem Versuch NIV_2.1 eine Schicht mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden aufgedruckt und vernetzt. Im Anschluss wird die Tintentopographie vermessen und der Rauheitswert ermittelt. Der Vorgang des Versuchs NIV_2.2 gleicht dem Vorgang des Versuchs NIV_2.1 mit dem Unterschied, dass die Nivellierungszeit t_N bei 20 Sekunden liegt. Der Versuch NIV_2.3 wird mit einer Nivellierungszeit t_N von 40 Sekunden durchgeführt und in dem Versuch NIV_2.4 wird die Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden verwendet. Die Abstände zwischen den Nivellierungszeiten werden durch den Versuch NIV_2.5, in dem die Tinte nach einer Nivellierungszeit t_N von 10 Sekunden, den Versuch NIV_2.6, in dem die Tinte nach einer Nivellierungszeit t_N von 30 Sekunden und den Versuch NIV_2.7, in dem die Tinte nach einer Nivellierungszeit t_N von 50 Sekunden vernetzt wird, verkleinert.

Tabelle 4-6: Versuchsdurchführung zur Analyse des Einflusses der Nivellierungszeit t_N auf den Glättungsverlauf Sa_n bei einer definierten Substratopographie W_{120} zur Bestimmung der Tintentopographie Sa_{EST} .

Bezeichnung		NIV_2.1	NIV_2.2	NIV_2.3	NIV_2.4
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8	8	8
Parameter	Substratopographie	W_{IG10}	W_{IG10}	W_{IG10}	W_{IG10}
	Auftragsform	Flächig	Flächig	Flächig	Flächig
	Mittlere Schichtdicke h in μm	15	15	15	15
	Nivellierungszeit t_N in s	0,006	20	40	60
	Anzahl Druckdurchgänge n	1	1	1	1
	Anzahl Messpunkte MP	5	5	5	5
Mess-vorschrift	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3

Bezeichnung		NIV_2.5	NIV_2.6	NIV_2.7
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8	8
Parameter	Substratopographie	W_{IG10}	W_{IG10}	W_{IG10}
	Auftragsform	Flächig	Flächig	Flächig
	Mittlere Schichtdicke h in μm	15	15	15
	Nivellierungszeit t_N in s	10	30	50
	Anzahl Druckdurchgänge n	1	1	1
	Anzahl Messpunkte MP	5	5	5
Mess-vorschrift	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3	3 x 3

4.4.3.4 Spezifische Einstellungen der Versuchsreihe Schichtdicke

Die Tinte wird flächig auf die definierte Substrattopographie W120 aufgedruckt. Die mittlere Schichtdicke h der Tinte variiert und wurde durch die Messung des Abstandes einer auf Folie gedruckten Schicht zur unbedruckten Folie mit dem 3D-Konfokalmikroskop μ surf custom der Firma Nanofocus AG (Oberkochen) bestimmt. Die Schichtdicke der Versuche DIC_1.1 bis DIC_1.3 wird nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden vernetzt, Tab. 4-7. Aufgrund der variablen Schichtdicke variiert die Anzahl der Druckdurchgänge n . Nach jeder einzelnen Schicht wird die Topographie vermessen.

Der Versuch DIC_1.1 wird an der Substrattopographie W120 durchgeführt. Die mittlere Schichtdicke h liegt bei 10 μm und wird pro Druckdurchgang aufgebracht. Insgesamt werden 35 Druckdurchgänge durchgeführt. Der Versuch DIC_1.2 wird ebenfalls an der Substrattopographie W120 realisiert. Die aufgedruckte mittlere Schichtdicke h entspricht 12 μm und wird pro Druckdurchgang aufgebracht. Insgesamt werden 25 Druckdurchgänge durchgeführt. Für den Versuch DIC_1.3 wird die Substrattopographie W120 herangezogen. Die aufgedruckte mittlere Schichtdicke h entspricht 15 μm und wird pro Druckdurchgang aufgebracht. Insgesamt werden 15 Druckdurchgänge durchgeführt.

Tabelle 4-7: Versuchsdurchführung zur Analyse des Einflusses der Schichtdicke h auf den Glättungsverlauf Sa_n bei einer definierten Substrattopographie W120.

Bezeichnung		DIC_1.1	DIC_1.2	DIC_1.3
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8	8
	Substrattopographie	W120	W120	W120
Parameter	Auftragsform	Flächig	Flächig	Flächig
	Schichtdicke h in μm	10	12	15
	Nivellierungszeit t_N in s	0,006	0,006	0,006
	Anzahl Druckdurchgänge n	35	25	15
	Anzahl Messpunkte MP	5	5	5
Mess-vorschrift	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3	3 x 3

Die Versuchsreihe, bestehend aus den Versuchen DIC_2.1 bis DIC_2.3, dient der Identifizierung der Tintentopographie, Tab.4-8. Die definierte Substrattopographie W120 wird mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden innerhalb von zehn Druckdurchgängen mit einer aufgedruckten, mittleren Schichtdicke h von 15 μm geglättet. Diese mit Inkjet geglättete, neue Substrattopographie wird W_{IG10} genannt. Auf die geglättete Substrattopographie W_{IG10} wird in dem Versuch DIC_2.1 eine Schicht mit der Schichtdicke h von 10 μm aufgebracht und nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden vernetzt. Im Anschluss wird die Tintentopographie vermessen und der Rauheitswert ermittelt. Der Vorgang des Versuchs

DIC_2.2 gleicht dem Vorgang des Versuchs DIC_2.1 mit dem Unterschied, dass die Schichtdicke h bei 12 μm liegt. Der Versuch DIC_2.3 wird mit einer Schichtdicke h von 15 μm durchgeführt.

Tabelle 4-8: Versuchsdurchführung zur Analyse des Einflusses der Schichtdicke h auf den Glättungsverlauf Sa_n bei einer definierten Substrattopographie W120 zur Bestimmung der Tintentopographie Sa_{EST} .

Bezeichnung		DIC_2.1	DIC_2.2	DIC_2.3
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8	8
Parameter	Substrattopographie	W_{IG10}	W_{IG10}	W_{IG10}
	Auftragsform	Flächig	Flächig	Flächig
	Mittlere Schichtdicke h in μm	10	12	15
	Nivellierungszeit t_N in s	0,006	0,006	0,006
	Anzahl Druckdurchgänge n	1	1	1
Mess-vorschrift	Anzahl Messpunkte MP	5	5	5
	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3	3 x 3

4.4.3.5 Spezifische Einstellungen der Versuchsreihe Auftragsform

Die Versuchsreihe, bestehend aus den Versuchen AF_1 bis AF_4, untersucht das Glättungsverhalten in Abhängigkeit des flächigen oder selektiven Tintenauftrags mit zunehmendem Druckdurchgang n . Die Tinte wird auf eine lasergesinterte Platte mit einer undefinierten Substrattopographie Wsls aufgedruckt. Die Substrattopographie Wsls wird in dem ersten Versuch AF_1 auf einer Fläche von 3 x 3 mm² aufgenommen. Die Messfläche wird mithilfe einer Aufnahme genau positioniert. Das flächige Topographiebild wird in ein Graustufenbild transponiert, wobei die dunklen Bereiche die Täler darstellen. Das Graustufenbild der Topographie wird exakt auf den markierten Bereich aufgedruckt und so lediglich die Täler befüllt⁴. Die Vernetzung erfolgt nach 6 Millisekunden. Insgesamt werden 15 Schichten mit variierender mittlerer Schichtdicke h aufgebracht. Zum Vergleich wird im Versuch AF_3 eine undefinierte Substrattopographie Wsls 15-fach flächig mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm und einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden aufgedruckt. Der gleiche Vorgang wird im Versuch AF_4 durchgeführt, mit dem Unterschied, dass die Nivellierungszeit t_N bei 60 Sekunden liegt. Die gesamte Schichtanzahl aus den Druckdurchgängen n beträgt in diesem Versuch zwölf Schichten. Da das selektive Bedrucken ein vollständiges Nivellieren mit geringer, mittlerer Schichtdicke h darstellt, stellt der Versuch AF_2 das flächige Bedrucken mit gleichen Parametern gegenüber. Im Versuch AF_2 wird eine

⁴ vgl. Patent [Gayduschek and Finsterwalder (2016)]

Schicht mit einer mittleren Schichtdicke h von 8 μm flächig auf die Substrattopographie Wsls gedruckt. Die Nivellierungszeit t_N liegt bei 60 Sekunden. Insgesamt finden zehn Druckdurchgänge statt, Tab.4-9.⁵

Tabelle 4-9: Versuchsdurchführung zur Analyse des Einflusses der Auftragsform auf den Glättungsverlauf Sa_n bei variabler Nivellierungszeit t_N und Schichtdicke h .

Bezeichnung		AF_1	AF_2	AF_3	AF_4
Materialien	Tinte	LH-100W	LH-100W	LH-100W	LH-100W
	Substrat	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12	SLS PA12
Druck-einstellung	Auflösung in dpi	600 x 600	600 x 600	600 x 600	600 x 600
	Passanzahl	8	8	8	8
Parameter	Substrattopographie	Wsls	Wsls	Wsls	Wsls
	Auftragsform	Selektiv	Flächig	Flächig	Flächig
	Mittlere Schichtdicke h in μm	variabel	8	15	15
	Nivellierungszeit t_N in s	0,006	60	0,006	60
Mess-vorschrift	Anzahl Druckdurchgänge n	15	10	15	12
	Anzahl Messpunkte MP	5	5	5	5
	Messfläche MF in mm x mm	3 x 3	3 x 3	3 x 3	3 x 3

Anhand der Versuche kann die theoretische Modellbildung auf ihre Richtigkeit hin überprüft werden.

4.4.3.6 Spezifische Einstellungen zur Qualifizierung der Druckbildqualität

Der Versuch QM_1 befasst sich mit der Untersuchung des Einflusses der Substrattopographie auf die Druckbildqualität. Eine frei gewählte Grafik wurde auf unterschiedliche Substrattopographien mit einer Auflösung von 600 x 600 dpi bei 8 Pass aufgedruckt. Als Substrattopographie wird neben der undefinierten Substrattopographie Wsls, eine lasergesinterte Platte aus PA12 extern chemisch geglättet und in die Substrattopographie W_{CG} überführt. Eine weitere Platte wird extern mechanisch mittels Gleitschleifen nachbearbeitet. Daraus folgt die Substrattopographie W_{MG} . Die vierte Substrattopographie wird mit Hilfe der Einstellungen des Versuchs NIV_1.4 und drei Druckdurchgängen geglättet und daraus die Substrattopographie W_{IG} gewonnen. Die Messung der fünf Messpunkte erfolgte bevor die Grafik für die Analyse der Druckbildqualität auf die Substrattopographien gedruckt wurde.

⁵ Der Versuch AF_1 wurde von Martin Roggow und die Versuche AF_2 bis AF_4 wurden von Monisha Yoganathan ausgeführt und die Rohdaten für eine weitere Auswertung in dieser Arbeit herangezogen [vgl. Yoganathan (2017), Roggow (2017)].

5 Ergebnisse zur theoretischen Modellbildung

Die Modellbildung des Glättungsverlaufs Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n gibt die theoretische Rauheitsabnahme mit zunehmendem Druckdurchgang an. Für die Verifizierung dieses Modells werden die Randbedingungen auf Basis der Tinteneigenschaften überprüft und im Anschluss das Modell der Glättung verifiziert. Nach der Verifizierung erfolgt eine theoretische Betrachtung der Validierung des Modells. Daraus ergibt sich die Quintessenz aus den Untersuchungen.

Auf die Modellbildung des Glättungsverlaufs Sa_n folgt im Anschluss die Modellbildung der partiellen Materialverteilung. Das Modell der partiellen Materialverteilung unterstützt das Verständnis des Glättungsverlaufs aus dem Modell der Glättung, indem die Schichtdickenverteilung des Tintenfilms auf den Spitzen und in den Tälern nach jedem einzelnen Druckdurchgang durch die gemessenen Rauheit R_z berechnet wird. Dieses inkludiert ebenfalls die Modellentwicklung, die Verifizierung, die Validität des Modells sowie die Quintessenz der Ergebnisse.

5.1 Modellbildung des Glättungsverlaufs

Die Vorhersage des Glättungsverlaufs Sa_n ist ein entscheidender Faktor für einen wirtschaftlichen Prozess. Mittels der Modellbildung lässt sich der Glättungsverlauf Sa_n vorhersagen und die benötigten Druckdurchgänge n im vornherein abschätzen.

In einem ersten Schritt wird das Modell der Glättung entwickelt und im Anschluss die Voraussetzung für eine Verifizierung des Modells untersucht. Anschließend wird der Glättungsverlauf Sa_n des Modells verifiziert. Zuletzt folgt die Eingrenzung des Modells anhand seiner Validität und die Quintessenz aus den zuvor gewonnenen Ergebnissen. Für die Verifizierung des Modells der Glättung werden die Versuche MOD_1.1 und MOD_1.2 herangezogen. Die Tintentopographie (kurz: EST, „Eigenstruktur der Tinte“) wird mit den Versuchen MOD_2.1 und MOD_2.2 analysiert.

5.1.1 Modellentwicklung

Eine ebenmäßig glatte Oberfläche besitzt keine Topographie und somit theoretisch keine Rauheit. Das Funktionsprinzip der Inkjet-Technologie lässt, neben den möglichen hydrophilen oder hydrophoben Eigenschaften des Substratmaterials, keine ebenmäßig glatte Oberfläche zu. Aufgrund des Tröpfchenauftrags bildet sich eine Spur aus. Definierte Volumina werden punktuell auf definierte Positionen in Form von Druckpunkten auf das Substrat aufgebracht. Mehrere Druckpunkte reihen sich im Querschnitt aneinander und bilden eine mikroskopisch raue Struktur aus, Abb. 5-1b, die im weiteren Verlauf Tintentopographie genannt wird. Die Tintentopographie kann durch eine Überlagerung von einzelnen wellenförmigen Funktionen mit der Wellenlängen λ und der zugehörigen Amplitude a_0 beschrieben werden, Abb. 5-1a.

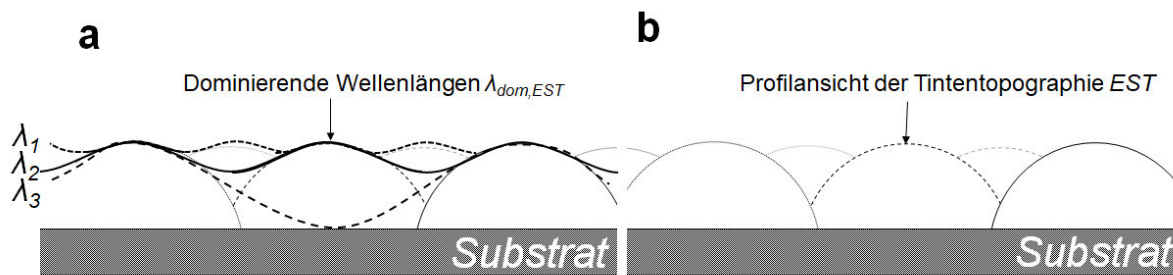


Abbildung 5-1: Darstellung eines Profils aus dem Inkjet-Druck mit a) der Beschreibung der Tintentopographie aus einer Überlagerung unterschiedlicher Wellenfunktionen mit der Wellenlänge λ und b) der Profilansicht der Tintentopographie.

Die Wellenlänge der Wellenfunktion mit der ausgeprägtesten Amplitude a dominiert das Erscheinungsbild der Tintentopographie und wird dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ genannt. Sind die Druckpunkte auf das Substrat gebracht, bildet sich eine Tintentopographie aus, die mit der aus dem Drucker abgegebenen Tröpfchengröße und dem Druckpunktabstand aus der vorgegebenen Auflösung zusammenhängt. Die Druckpunkte sind, aufgrund der Nivellierungszeit t_N von 0 Sekunden, noch nicht gespreitet, sodass diese die anfängliche, dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ mit deren Amplitude a_0 ausbilden, Abb. 5-2a. Diese Amplitude beschreibt, analog zur arithmetische Mittenrauheit Ra_0 und Sa_0 , die betragsmäßige, mittlere Abweichung des Ausschlags zur Mittellinie. Die Korrelation der Amplitude zur Rauheit ist proportional. Die Wellenfunktion verändert sich, solange die Tinte im unvernnetzten Zustand fließen kann. Die Tinte nivelliert. Steigt die Nivellierungszeit t_N , nimmt die Amplitude a_t der Wellenfunktion ab, während die dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ unverändert bleibt, Abb. 5-2b. Nach einer definierten Nivellierungszeit t_N wird die Tintentopographie, die der Wellenfunktion entspricht, mit UV-Licht belichtet. Die Tinte wird durch die startende Vernetzungsreaktion der Moleküle am weiteren Fließen gehindert und verharrt in seiner, zu diesem Zeitpunkt bestehenden, Tintentopographie. Diese Tintentopographie ist charakteristisch für die verwendete Nivellierungszeit t_N , die druckspezifische Druckpunktgröße und den auflösungsbezogenen Druckpunktabstand. Sie beschreibt die Tintentopographie auf ebenmäßig glattem Untergrund und besitzt eine charakteristische arithmetische Mittenrauheit Sa_{ESTt} der Tintentopographie.

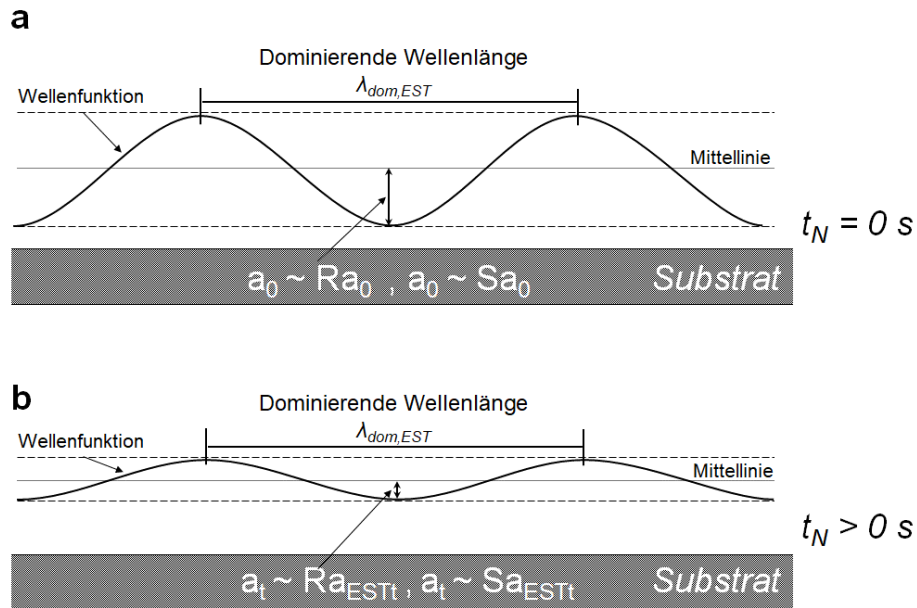


Abbildung 5-2: Schematische Proportionalität der Amplitude a zu den Rauheitskenngrößen Ra und Sa . Gegenüberstellung der Nivellierung der Tintentopographie anhand a) der Darstellung der Topographie als eine Wellenfunktion mit der Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ und der Amplitude a_0 bei einer Nivellierungszeit t_N gleich null Sekunden, sowie b) einer Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ und der Amplitude a_t bei einer Nivellierungszeit t_N größer als null Sekunden.

Die aus dem Inkjet-Druck charakteristische Tintentopographie verändert das Verhältnis der anfänglichen Amplitude a_0 zur zeitlich veränderten Amplitude a_t nach Gleichung 2.17 (Kap. 2.4) logarithmisch. Aufgrund der Proportionalität der Amplitude a zur arithmetischen Mittenrauheit Sa , resultiert die Annahme, dass das Verhältnis der anfänglichen, arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST0} der Tintentopographie zur zeitlich veränderten arithmetischen Mittenrauheit Sa_{ESTt} der Tintentopographie ebenfalls logarithmisch abnimmt. Daraus wiederum resultiert, dass die Rauheit analog zur Gleichung 2.17 aus Kapitel 2.4 mit

$$\ln\left(\frac{Sa_{EST0}}{Sa_{ESTt}}\right) \sim \ln\left(\frac{a_0}{a_t}\right) = \left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N}{3 \cdot \lambda^4 \cdot \eta}\right) \quad (5.1)$$

mit:

Sa_{EST0}	anfängliche arithmetischen Mittenrauheit der Tintentopographie,
Sa_{ESTt}	arithmetische Mittenrauheit zu einem Zeitpunkt t_N ,
a_0	der anfänglichen Amplitude,
a_t	der Amplitude nach einer definierten Zeit t_N ,
σ_T	Oberflächenspannung der Tinte,
h	mittlere Schichtdicke der Tintenschicht,
t_N	Nivellierungszeit,
λ	Wellenlänge,
η	Viskosität der Tinte

logarithmisch abnimmt. Da sich die Tintentopographie dynamisch mit der Zeit verändert, nimmt deren arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} mit der Zeit t_N exponentiell ab. Wird die Proportionalität zwischen dem Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST0} zu Sa_{ESTt} und der Amplitude a_0 zu a_t aus Gleichung 5.1 mit dem Proportionalitätsfaktor B aufgelöst und auf

die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} umgestellt, nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} mit zunehmender Nivellierungszeit t_N nach der Gleichung

$$Sa_{EST}t = B \frac{Sa_{EST0}}{\exp\left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N}{3 \cdot \lambda^4 \cdot \eta}\right)} \quad (5.2)$$

mit:

Sa_{ESTt}	arithmetische Mittenrauheit zu einem Zeitpunkt t_N ,
Sa_{EST0}	anfängliche arithmetischen Mittenrauheit der Tintentopographie,
B	Proportionalitätsfaktor,
σ_T	Oberflächenspannung der Tinte,
h	mittlere Schichtdicke der Tintenschicht,
t_N	Nivellierungszeit,
λ	Wellenlänge,
η	Viskosität der Tinte

ab. Die dominierenden Einflussfaktoren auf die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie sind die applizierte Schichtdicke h , sowie die Wellenlänge λ der Druckpunktabstände.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{ESTt} der Tintentopographie gilt auf ebenmäßig glattem Untergrund. Ist diese ebenmäßig glatte Substrattopographie durch eine raue Substrattopographie ersetzt, verändert sich der Glättungsverlauf Sa_n zusätzlich. Das Profil der Substrattopographie gleicht einer Wellenfunktion, deren Amplitude theoretisch betrachtet der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n entspricht. Die Glättung einer rauen Substrattopographie mittels Inkjet gedruckter Schichten setzt voraus, dass die gleichmäßig aufgebrauchte Tinte von den hervorstehenden Spitzen in die zu füllenden Täler der Substrattopographie fließt. Die homogen aufgebrauchte Schicht fließt durch die Hangabtriebs- und Gravitationskraft in die umliegenden Täler. Das Tintenniveau auf den Spitzen der Substrattopographie nimmt durch die Abfließbewegung ab. Gleichzeitig sammelt sich die abgeflossene Tinte in den Tälern, wodurch das Tintenniveau in den Tälern aufgebaut wird. Eine Nivellierungszeit t_N , die wesentlich größer als null ist, gewährleistet, dass sich die gesamte Tinte in den Tälern ansammelt und der Glättungsfortschritt ΔSa_t während dem Nivellierungsvorgang maximal wird, Abb. 5-3.

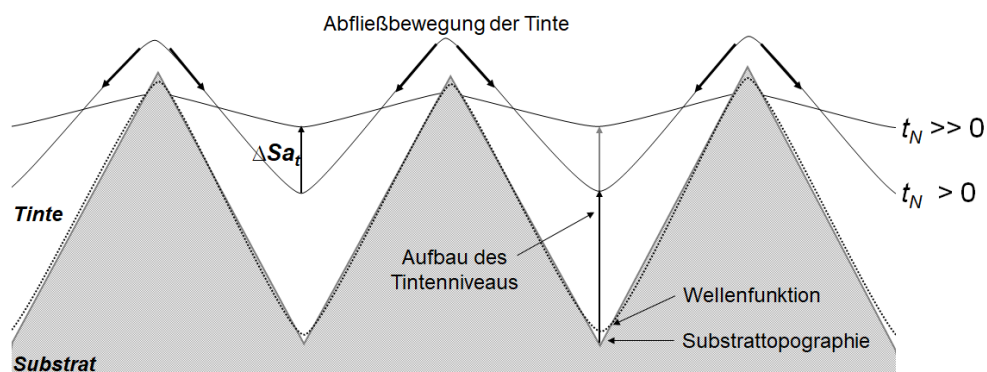


Abbildung 5-3: Fließbewegung der Tintenschicht auf einer unebenen Substrattopographie. Tinte fließt durch die Abfließbewegung von den Spitzen in die Täler. Das Tintenniveau in den Tälern nimmt im gleichen Maße zu.

Die Nivellierungszeit t_N bestimmt den Glättungsverlauf Sa_n einer Substrattopographie, die durch mehrlagiges Bedrucken geglättet wird. In der Nivellierungszeit t_N wirkt eine Fließbewegung der Tinte auf der Substrattopographie, woraus ein Glättungsverlauf Sa_n der Substrattopographie bei definierter Nivellierungszeit t_N resultiert. Dieser Glättungsverlauf durchläuft zwei Phasen. In beiden Phasen überlagern sich die Tintentopographie und die Substrattopographie, jedoch mit unterschiedlicher Dominanz.

In Phase I dominiert die Substrattopographie die Tintentopographie. Die zunächst homogen applizierte Schicht mit der Schichtdicke h verteilt sich heterogen auf der Substrattopographie. Die Tinte fließt innerhalb der Nivellierungszeit t_N in die Täler der Substrattopographie, wodurch sich dort vermehrt Tinte ansammelt. Mit jedem weiteren Druckdurchgang n_i sammelt sich mehr Tinte in den Tälern der Substrattopographie, bis diese nach einer bestimmten Anzahl an Druckdurchgängen n_i vollständig aufgefüllt sind. Mit jedem zunehmenden Druckdurchgang nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa um den variablen Glättungsfortschritt ΔSa_n ab. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n entspricht hierbei der Rauheitsabnahme zweier aufeinander folgender arithmetischer Mittenrauheitswerte Sa_n und Sa_{n+1} aus zwei aufeinander folgenden Schichten der Druckdurchgänge. Das Ausgleichen der Täler der Substrattopographie bewirkt, dass sich das Verhältnis der Substrattopographie zur Tintentopographie verändert. Dominiert die Tintentopographie die Substrattopographie, befindet sich der Glättungsverlauf Sa_n in Phase II. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n nimmt nicht mehr weiter zu und die maximale Glättung ist erreicht. Die Tintentopographie dominiert, sobald die arithmetische Mittenrauheit Sa_n der Substrattopographie unter der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie liegt, Abb. 5-4.

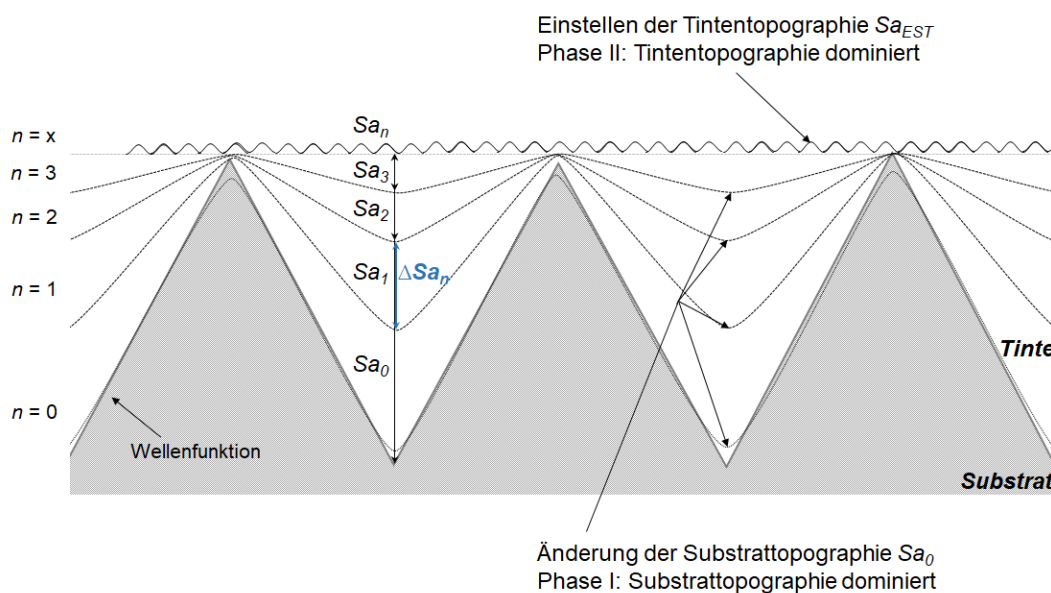


Abbildung 5-4: Stark vereinfachte, schematische Darstellung der zwei Phasen während der Glättung mit unterschiedlicher Dominanz. Phase I entspricht der dominierenden Substrattopographie über die Tintentopographie nach den ersten Druckdurchgängen n und Phase II zeigt die dominierende Tintentopographie nach n_i Druckdurchgängen nachdem die Täler der Substrattopographie gefüllt sind.

In Phase I ist das Verhalten der Tinte dynamisch und die Topographie verändert sich durch die abwärts gerichtete Fließbewegung der Tinte. Die Glättung des Substrats innerhalb der Nivellierungszeit t_N wird von der Viskosität η der Tinte, der Oberflächenspannung σ der Tinte und der Schichtdicke h des Inkjet-Drucks beeinflusst. Ist die Nivellierungszeit t_N zu gering gewählt, so wird die Tinte während des Abfließens in dem vorherrschenden Zustand eingefroren. Daraus resultiert, dass sich nicht die gesamte Tinte in den Tälern befindet, sondern auch an den Flanken zu finden ist. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n ist geringer und die Glättung schreitet langsamer voran. Das Verhältnis zwischen Substrat- und Tintentopographie wird in dieser ersten Phase von der Substratopographie dominiert. Dennoch wird die Substratopographie durch die Umverlagerung der Tinte eingeebnet. Es wird angenommen, dass die Substratopographie, abhängig von der Ausprägung, durch die Umverlagerung der Tinte, logarithmisch aufgefüllt wird. Da für das Auffüllen wiederum das Fließverhalten der Tinte verantwortlich ist, wird angenommen, dass der Glättungsverlauf Sa_n dem Modell von De Gennes aus Kapitel 2.4 ähnelt, mit dem Unterschied, dass nicht die Nivellierungszeit t_N variiert, sondern die arithmetische Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n_i abnimmt. Während De Gennes seine Betrachtung des Prozesses bis zur vollständigen Nivellierung durchführt, wird in dem Modell der Glättung der Nivellierungsprozess zu einer definierten Nivellierungszeit t_N gestoppt und ist damit eine statische Variable. Die neue dynamische Variable in dem Modell ist die Anzahl der Druckdurchgänge n_i , die zunimmt. Es ergibt sich ein proportionaler Zusammenhang der Verhältnisse

$$\ln\left(\frac{Sa_0}{Sa_n}\right) \cdot \frac{1}{n_i} \sim \ln\left(\frac{a_0}{a_t}\right) = \left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N}{3 \cdot \lambda^4 \cdot \eta}\right) \quad (5.3)$$

mit:

Sa_0	arithmetischen Mittenrauheit aus der Substratopographie,
Sa_n	der arithmetischen Mittenrauheit nach n Druckdurchgängen,
n_i	Anzahl der Druckdurchgänge,
a_0	der anfänglichen Amplitude,
a_t	der Amplitude nach einer definierten Zeit t_N ,
σ_T	Oberflächenspannung der Tinte,
h	mittlere Schichtdicke der Tintenschicht,
t_N	Nivellierungszeit,
λ	Wellenlänge,
η	Viskosität der Tinte

analog zur Gleichung 2.17 aus Kapitel 2.4. Das Verhältnis der anfänglichen arithmetischen Mittenrauheit Sa_0 der Substratopographie zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_n pro Druckdurchgang n_i ist proportional zum Verhältnis der anfänglichen Amplitude a_0 zur Amplitude a_t nach einer definierten Nivellierungszeit t_N . Die Eigenschaften der Tinte, wie die Oberflächenspannung σ_T oder die Viskosität η , aber auch die Druckeinstellungen, die den Druckpunkt Abstand, die Druckpunktgröße und -position beeinflussen, sind für den Glättungsverlauf Sa_n einer rauen Substratopographie verantwortlich. Die Druckeinstellungen verursachen damit eine Tintentopographie. Diese besitzt eine charakteristische, dominierende

Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ bei einer definierten Nivellierungszeit t_N . Wird die Proportionalität zwischen dem Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_0 zu Sa_n und der Amplitude a_0 zu a_t bei einer definierten Nivellierungszeit t_N aus Gleichung 5.3 mit dem Proportionalitätsfaktor B aufgelöst und auf die arithmetische Mittenrauheit Sa_n umgestellt, nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n pro Druckdurchgang n_i nach der Gleichung

$$Sa_n = B \frac{Sa_0}{\exp\left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N \cdot n_i}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)} \quad (5.4)$$

mit:

Sa_n	arithmetische Mittenrauheit nach n Druckdurchgängen,
Sa_0	anfängliche arithmetischen Mittenrauheit der Substrattopographie,
B	Proportionalitätsfaktor,
σ_T	Oberflächenspannung der Tinte,
h	mittlere Schichtdicke der Tintenschicht,
t_N	Nivellierungszeit,
$\lambda_{dom,EST}$	dominierende Wellenlänge der Tintentopographie,
η	Viskosität der Tinte,
n_i	Druckdurchgang

ab. Die Tinte wird in dem ganzheitlichen System, welches das Glätten der Substrattopographie mit einer Tintentopographie bei definierter Nivellierungszeit t_N darstellt, nicht mehr als dynamische Größe, sondern als statische Größe betrachtet. Diese statische Betrachtung limitiert den Glättungsverlauf Sa_n auf eine definierte Rauheit, da die Tinte eine eigene Topographie besitzt und so keine ebenmäßig planare Konfiguration erreicht werden kann. Der Glättungsverlauf Sa_n wird durch die Tintentopographie eingegrenzt, deren Topographie die minimale Rauheit bildet. Die minimal erreichbare Rauheit stellt sich ein, sobald die Substrattopographie die Tintentopographie nicht mehr dominiert. Somit richtet sich der exponentielle Verlauf nach der Tintentopographie. Seine Randbedingungen sind die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 aus der Substrattopographie und die resultierende minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} , die aus der Tintentopographie besteht. Der Glättungsverlauf Sa_n findet in dem Bereich der anfänglichen arithmetischen Mittenrauheit Sa_0 und der minimal erreichbaren arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} statt, wobei die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} aus der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie bei einer definierten Nivellierungszeit t_N resultiert und die untere Grenze der möglichen arithmetischen Mittenrauheit darstellt. Werden diese Randbedingungen in Gleichung 5.4 eingesetzt, folgt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n der Substrattopographie mit zunehmendem Druckdurchgang n der Gleichung

$$Sa_n = B \frac{Sa_0 - Sa_{ESTt}}{\exp\left(\frac{16 \cdot \pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N \cdot n}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)} + Sa_{ESTt} \quad (5.5)$$

mit:

Sa_n	arithmetische Mittenrauheit nach n Druckdurchgängen,
Sa_0	anfängliche arithmetischen Mittenrauheit der Substratopographie,
Sa_{ESTt}	arithmetische Mittenrauheit aus der Tintentopographie zum Zeitpunkt t_N ,
B	Proportionalitätsfaktor,
σ_T	Oberflächenspannung der Tinte,
h	mittlere Schichtdicke der Tintenschicht,
t_N	Nivellierungszeit,
$\lambda_{dom,EST}$	dominierende Wellenlänge der Tintentopographie,
η	Viskosität der Tinte,
n	Druckdurchgang

bei einer definierten Nivellierungszeit t_N . Die Tintentopographie dominiert, sobald die Täler der Substratopographie aufgefüllt sind und die, während dem Glättungsprozess neu entstehende Topographie, die Größenordnung der Tintentopographie unterschreitet. Diese Phase II beschreibt das Endstadium des Glättungsprozesses, da die Tintentopographie mit weiteren Druckdurchgängen n nicht weiter unterschritten wird. Die Verknüpfung der Gleichung 5.2 für den Glättungsverlauf Sa_{ESTt} der Tintentopographie mit der Gleichung 5.5 für den Glättungsverlauf Sa_n der Substratopographie ergibt die Gleichung

$$Sa_n = B \frac{\left(Sa_0 - \frac{Sa_{EST0}}{\exp\left(\frac{16 \pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)}\right)}{\exp\left(\frac{16 \pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N \cdot n}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)} + \frac{Sa_{EST0}}{\exp\left(\frac{16 \pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)} \quad (5.6)$$

mit:

Sa_n	arithmetische Mittenrauheit nach n Druckdurchgängen,
Sa_0	anfängliche arithmetischen Mittenrauheit der Substratopographie,
Sa_{EST0}	arithmetische Mittenrauheit der Tintentopographie,
B	Proportionalitätsfaktor,
σ_T	Oberflächenspannung der Tinte,
h	mittlere Schichtdicke der Tintenschicht,
t_N	Nivellierungszeit,
$\lambda_{dom,EST}$	dominierende Wellenlänge der Tintentopographie,
η	Viskosität der Tinte,
n	Druckdurchgang,

die die Gleichung des theoretischen Modells der Glättung darstellt.

Der theoretische Verlauf zeigt, dass die arithmetische Mittenrauheit Sa_0 des Substrats mit zunehmendem Druckdurchgang n exponentiell abnimmt, bis diese die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} , die arithmetische Mittenrauheit auf Basis der Tintentopographie, erreicht hat. Ab diesem Druckdurchgang ($n_{s,full}$) ist das freie Volumen der Substratopographie soweit gefüllt, dass die Substratopographie nicht weiter erkennbar ist. Die Tintentopographie dominiert nun die Substratopographie und es ist kein weiterer Glättungsfortschritt ΔSa_n vorhanden, Abb. 5-5.

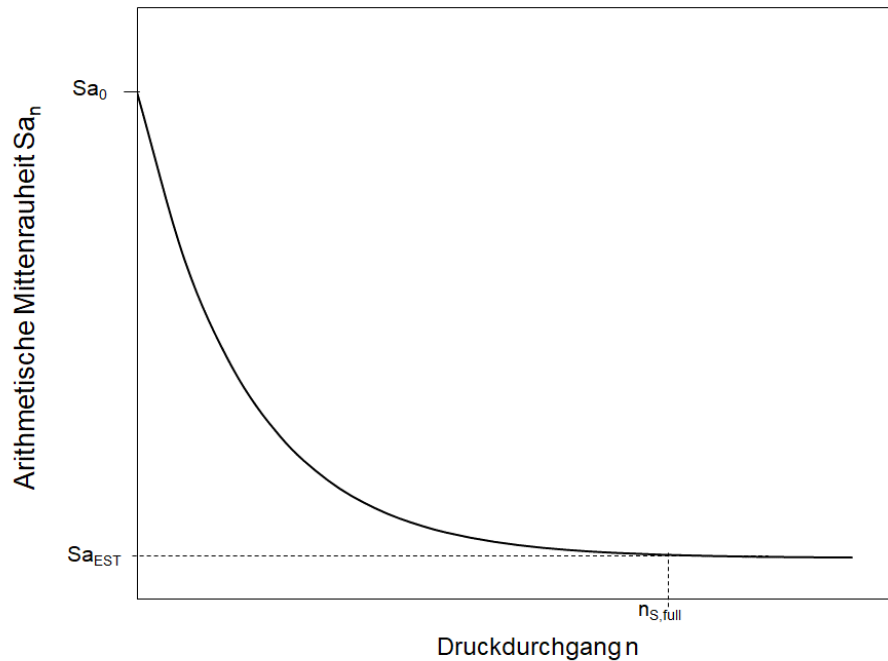


Abbildung 5-5: Schematischer Glättungsverlauf Sa_n der Substratopographie mit zunehmendem Druckdurchgang n nach dem Modell der Glättung. Arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt ab, bis die Substratopographie nach Druckdurchgang $n_{S,full}$ vollständig gefüllt ist und die Tintentopographie Sa_{EST} die Substratopographie dominiert.

5.1.2 Voraussetzung für die Modellverifizierung

Voraussetzung für die Verifizierung des Modells nach Gleichung 5.6 ist die Filmbildung der Tinte auf dem Substrat. Die Filmbildung findet statt, sobald die Oberflächenspannung σ_{sg} des Substrats circa 10 mN/m über der Oberflächenspannung σ_T der Tinte liegt (Rulison, 2007). Die Oberflächenspannung σ_{sg} des unbedruckten Substrats liegt bei $48 \pm 0,5$ mN/m. Die Tinte besitzt eine Oberflächenspannung σ_T von $34 \pm 0,2$ mN/m. Die Oberflächenspannung σ_T der Tinte liegt im Mittel bei 14 mN/m unter der freien Oberflächenspannung σ_{sg} des Substrates. Damit kann die Bedruckbarkeit des unbedruckten Substrats mit der Tinte vorausgesetzt werden. Die Substratopographie wird mit zunehmendem Druckdurchgang n mit Tinte bedeckt. Bei ausreichender Schicht ist das Substrat vollständig mit Tinte bedeckt und das Substrat tritt nicht mehr in Kontakt mit neu aufgetragener Tinte. Die neue Oberfläche besteht vollständig aus vernetzter Tinte. Die freie Oberflächenspannung σ_{ST} der neu entstandenen Oberfläche bleibt mit $48 \pm 1,0$ mN/m unverändert zum Substrat. Diese liegt ebenfalls 14 mN/m über der Oberflächenspannung σ_T der Tinte. Zu jeder Zeit ist die Voraussetzung für eine Filmbildung gegeben.

5.1.3 Modellverifizierung

Die Verifizierung des Glättungsverlaufs Sa_n nach dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) mit zunehmendem Druckdurchgang n erfolgt mittels experimentellen Untersuchungen nach den Versuchen MOD_1.1 und MOD_1.2, sowie MOD_2.1 und MOD_2.2.

Das Modell der Glättung (Gl. 5.6) besteht aus zwei Rauheitskomponenten, zum einen aus der arithmetischen Mittenrauheit Sa_0 der Substratopographie und zum anderen aus der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST0} der Tintentopographie. Zunächst wird der Glättungsverlauf Sa_n der Substratopographie mit zunehmendem Druckdurchgang n bei maximalen Glättungsfortschritt ΔSa_n untersucht. Um den Einfluss der Tintentopographie zu verringern, wird die Nivellierungszeit t_N ausreichend hoch gesetzt, sodass die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST0} der Tintentopographie gegen 0 μm geht, Abb. 5-6.

$$Sa_n = B \frac{Sa_0 - \frac{Sa_{EST0}}{\exp\left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)} + \frac{Sa_{EST0}}{\exp\left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)}}{\exp\left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N \cdot n}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)}$$

↓ Ausdruck → 0

$$Sa_n = B \frac{Sa_0}{\exp\left(\frac{16\pi^4 \cdot \sigma_T \cdot h^3 \cdot t_N \cdot n}{3 \cdot \lambda_{dom,EST}^4 \cdot \eta}\right)}$$

Abbildung 5-6: Vereinfachung des Modells der Glättung (Gl. 5.6) mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden zur Verifizierung des Modells ohne Einfluss der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST0} der Tintentopographie.

Nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden wird keine Fließbewegung mehr erwartet. Die Tintentopographie ist minimiert und nähert sich null μm . Mit dieser Nivellierungszeit kann der Glättungsverlauf Sa_n der Substratopographie W120 mit zunehmendem Druckdurchgang n analysiert werden, ohne dass ein Einfluss der Tintentopographie zu erwarten ist. Für die Verifizierung der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie (Gl. 5.2) wird der Versuch MOD_2.2 herangezogen, die eine Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden vorgibt. Mittels der, mit Hilfe einer Software berechneten, Fast-Fourier-Transformation wird die experimentell bestimmte Tintentopographie in ein Spektrum aus Einzelwellenlängen λ zerlegt, die die Tintentopographie unterschiedlich stark beeinflussen. Die Wellenlänge λ mit der ausgeprägtesten Amplitude a wird dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ genannt und zur Berechnung der theoretischen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} herangezogen. Vorversuche haben gezeigt, dass eine anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST0} von 4 μm erwartet werden kann. Zur Berechnung der theoretischen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} mit der Gleichung 5.2, wird somit die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST0} mit

4 μm angenommen und die experimentell ermittelten, dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,EST}$ verwendet.

Die aus den experimentellen Versuchen ermittelte dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ variiert von 2450 μm bis hin zu 3290 μm , Tab.5-1. Diese Varianz wirkt sich auf die mit der Gleichung 5.2 theoretisch berechnete arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie aus. Die nach der Gleichung 5.2 des Modells der Tintentopographie berechnete, theoretische arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} liegt im Mittel bei $0,555 \pm 0,309 \mu\text{m}$. Die experimentell ermittelte arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden liegt im Mittel bei $0,581 \pm 0,013 \mu\text{m}$. Die experimentellen Werte der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} stimmen mit den theoretisch berechneten Werten der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} größtenteils überein, Tab. 5-1. Lediglich die theoretische arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Messpunkte MP 3 und MP 4 weichen von dem Mittelwert MW am stärksten ab.

Tabelle 5-1: Verifizierung der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie (Gl. 5.2) bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm anhand der experimentellen Versuche MOD_2.2 und den mit der Gleichung 5.2 theoretisch berechneten arithmetischen Mittenrauheiten Sa_{EST} mit der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ aus den experimentellen Versuchen und einer arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST0} anhand von 5 Messungen MP. Vergleich der Werte durch Bildung des Mittelwertes MW aus den Werten der fünf Messpunkte MP.

MOD_2.2	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	Mittelwert MW
Exp. $\lambda_{dom,EST}$ in μm	3090	2940	3290	2450	3090	2970 ± 284
Exp. Sa_{EST} in μm	0,566	0,569	0,596	0,580	0,595	$0,581 \pm 0,013$
Theor. Sa_{EST} in μm	0,656	0,441	0,980	0,041	0,656	$0,555 \pm 0,309$

Die hohe Fluktuation der experimentell ermittelten dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ und dementsprechend auch der theoretischen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} , ist bedingt durch den Vernetzungsvorgang, der analog zum Druckvorgang aus Abbildung 2-8 des Kapitels 2.3.2 durchgeführt wird. Hierbei ist der Druckkopf durch eine UV-Einheit ersetzt. Die UV-Einheit überfährt einzelne Bahnen und vernetzt diese. Das Streulicht der UV-Einheit vernetzt zudem oberflächlich die umliegende Tinte. Unter der oberflächlich vernetzten Tinte liegt noch flüssige Tinte vor. Auf dieser schwimmt die bereits vernetzte Tinte auf. Durch das Verfahren des Drucktischs in die nächste Position, staucht sich die aufschwimmende, bereits vernetzte Tinte zusammen und fächert sich auf. Es bilden sich Defekte aus, die einer aufgestauchten Milchkhaut (Milchkhaut-Effekt) gleichen, Abb.5-7 gestrichelter Kreis. Diese Defekte verfälschen die Tintentopographie und folglich fluktuiert die dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ stärker um

den Mittelwert MW. Die Abweichung der theoretischen, arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie, die sich mit der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ berechnet, zu der tatsächlich ermittelten experimentellen, arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie, kann ebenfalls auf diese Ursache zurückgeführt werden.

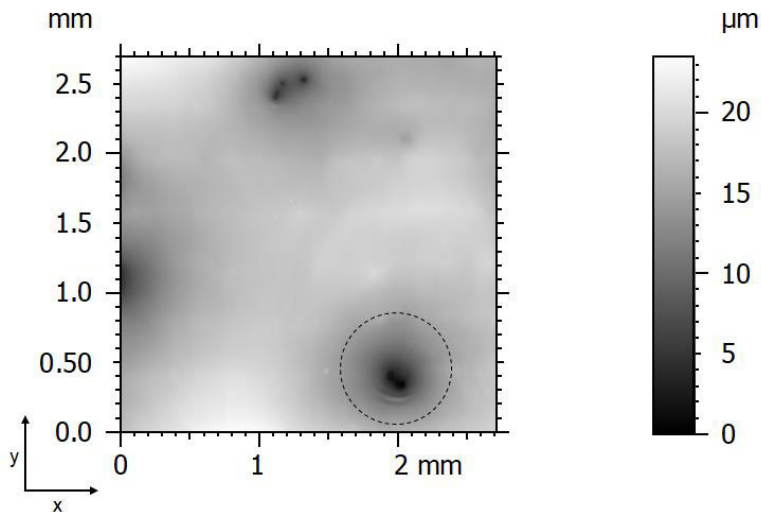


Abbildung 5-7: Topographieaufnahme der Tintentopographie aus der Konfokalmikroskopie des Messpunktes MP 4 auf einer vorgeglätteten Substratopographie W120. An der Vertiefung bei x gleich 2 mm hat sich umliegend vernetzte Tinte nach dem "Milchhaut"-Effekt aufgefächert.

Mittels des Versuchs MOD_1.2 wird der experimentelle Glättungsverlauf Sa_n der definierten Substratopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden untersucht.

Der experimentelle Glättungsverlauf Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n deckt sich mit dem theoretischen Verlauf des Modells der Glättung (Gl 5.6). Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 der definierten Substratopographie, auf die die Tinte aufgebracht wird, liegt im Mittel bei $28,4 \pm 1,4 \mu\text{m}$, Abb. 5-8. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt mit zunehmendem Druckdurchgang n exponentiell ab. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge n eine starke Glättung erfolgt. Die Tinte fließt stärker in die Täler der Substratopographie. Ab dem vierten Druckdurchgang reduziert sich die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nicht mehr signifikant. Es stellt sich ein Gleichgewicht um die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} von $1,7 \pm 0,5 \mu\text{m}$ ein.

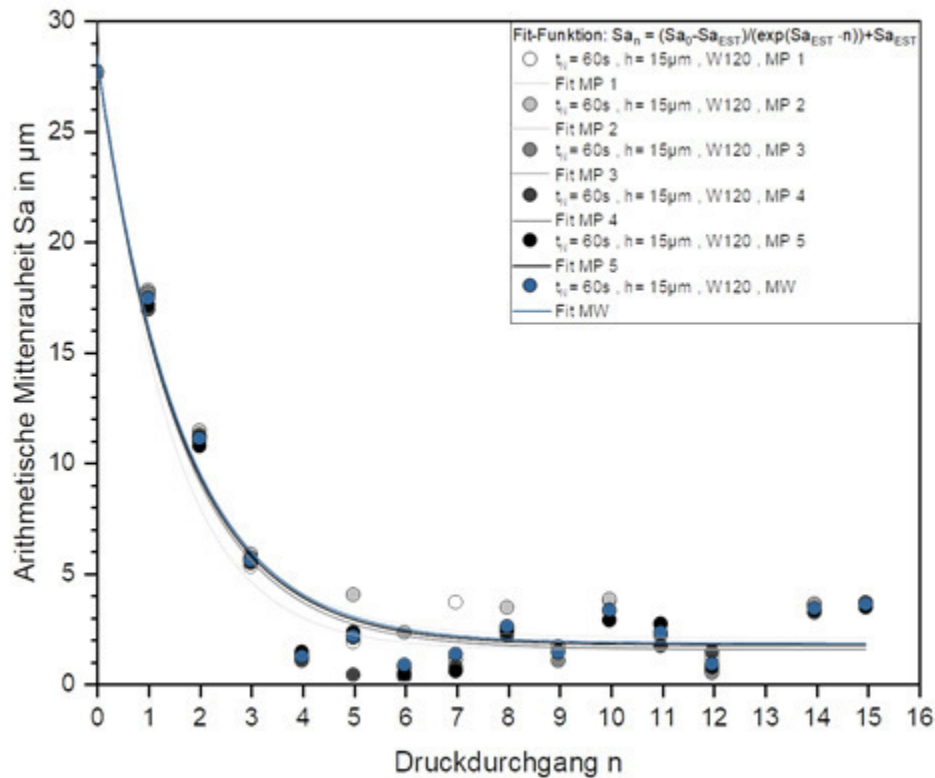


Abbildung 5-8: Verlauf der arithmetische Mittenrauheit Sa_n in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einem mittleren Schichtauftrag h von $15\mu m$. Verifizierung des theoretischen Modells der Glättung (Gl. 5.6) anhand der Fitfunktion. (Versuch MOD_2.2)

Die Betrachtung der dominierenden Wellenlänge λ_{dom} nach jedem Druckdurchgang n mittels der, mit Hilfe einer Software berechneten, Fast-Fourier-Transformation, spiegelt die Veränderung der dominierenden Wellenlänge λ_{dom} während des Glättungsverlaufs Sa_n wider. Der Vergleich dieser experimentellen dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,exp}$ mit den theoretischen dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,theor}$ aus der Fitfunktion nach Gleichung 5.6 gibt Aufschluss darüber, ob der Verlauf der Glättung mit der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie, oder der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,S}$ der Substrattopographie einhergeht. Diese wird durch einen Sprung der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,exp}$ ausgezeichnet, die durch die Druckdurchgänge n verändert wird. Die Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$, die das Modell der Glättung (Gl. 5.6) beeinflusst, wird durch die Fitfunktion auf Basis des Modells ermittelt.

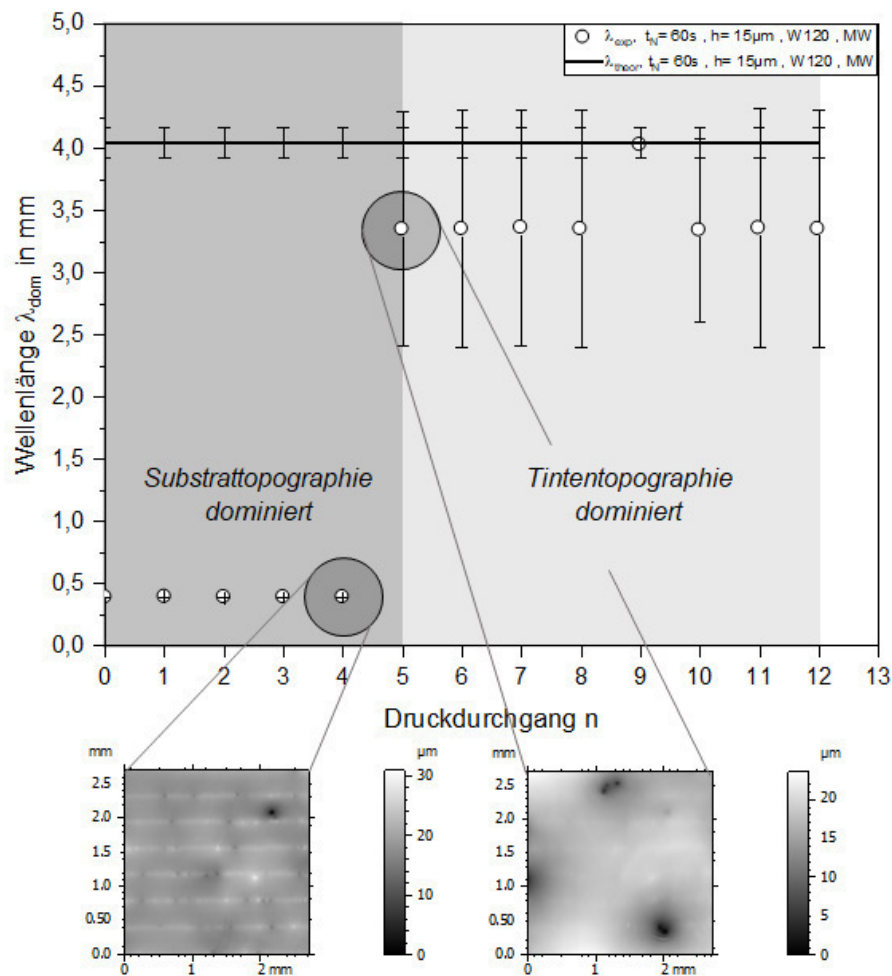


Abbildung 5-9: Aus Versuch MOD_2.2 experimentell ermittelte, dominierende Wellenlänge λ_{dom} aus der Fast-Fouriertransformation und die theoretisch berechnete Wellenlänge λ_{dom} (Gl. 5.6) aus der Fitfunktion in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden. Unten: Topographieaufnahmen aus der Konfokalmikroskopie mit links dominierender Substratopographie und rechts dominierender Tintentopographie.

Die experimentelle dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,exp}$ liegt bis zum vierten Druckdurchgang konstant bei $0,39 \pm 0,01$ mm, Abb.5-9. Die definierte Zahnstruktur der Substratopographie besitzt bis zum vierten Druckdurchgang ausgeprägte Spitzen in der Topographiedarstellung. Ab dem fünften Druckdurchgang schwächen die vorher klar erkennbaren Spitzen der definierten Zahnstruktur der Substratopographie ab, wodurch die anfänglich dominierende Substratopographie der nun dominierenden Tintentopographie weicht. Dies zeigt sich in dem Sprung der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,exp}$, die von $0,39 \pm 0,01$ mm auf $3,39 \pm 0,22$ mm ansteigt. Dieser Sprung deutet an, dass sich die dominierenden Verhältnisse der Substratopographie zur Tintentopographie umverlangert haben und die dominierende Wellenlänge λ_{dom} ab diesem Druckdurchgang aus der Tintentopographie abgeleitet wird. Die theoretische Wellenlänge $\lambda_{dom,theor}$, die sich aus der Fitfunktion auf Basis des Modells der

Glättung (Gl. 5.6) ergibt, befindet sich im Bereich der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,exp}$, die demzufolge der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ entspricht. Es bestätigt die Theorie, dass das Modell der Glättung (Gl. 5.6) durch die Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie beeinflusst wird.

Es zeigt sich in der graphischen Darstellung der dominierenden Wellenlänge λ_{dom} pro Druckdurchgang n , dass im Bereich der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie ab dem fünften Druckdurchgang eine stärkere Fluktuation um den Mittelwert MW auftritt.

Die experimentellen, dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie, die aus dem Mittelwert der einzelnen Messpunkte MP ab dem fünften Druckdurchgang bis zum zwölften Druckdurchgang gebildet werden, liegen nahe beieinander. Die Betrachtung der zugehörigen Standardabweichungen zeigt jedoch, dass innerhalb der Druckdurchgänge eine starke Fluktuation der dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,EST}$ existiert. Die experimentelle, dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie liegt mit einem Mittelwert MW von $3,39 \text{ mm} \pm 0,22 \text{ mm}$ geringfügig unter dem Mittelwert MW der theoretischen, dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$. Diese besitzt einen Mittelwert MW von $4,05 \pm 0,12 \text{ mm}$ und wird aus der Fitfunktion auf Basis der Gleichung 5.6 der fünf Messpunkte MP ermittelt. Die Einzelergebnisse aus der Fitfunktion für die theoretische, dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ fluktuiert nur unwesentlich um den Wert aus der Fitfunktion, Tab. 5-2.

Tabelle 5-2: Verifizierung der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ des Glättungsverlaufs Sa_n bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einem Schichtauftrag h von $15 \mu\text{m}$ anhand der experimentellen Versuche aus der Versuch MOD_1.2 und den mit der Gleichung 5.6 theoretisch berechneten dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ und der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ ab dem fünften Druckdurchgang anhand von 5 Messungen MP .

MOD_1.2	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	Mittelwert MW
Exp. $\lambda_{dom,EST}$ in mm	$3,31 \pm 0,93$	$3,52 \pm 0,87$	$3,53 \pm 0,87$	$3,27 \pm 0,98$	$3,30 \pm 1,12$	$3,39 \pm 0,22$
Theor. $\lambda_{dom,EST}$ in mm	$4,03 \pm 0,14$	$3,89 \pm 0,21$	$4,08 \pm 0,12$	$4,03 \pm 0,13$	$4,04 \pm 0,13$	$4,05 \pm 0,12$

Da die Messfläche auf $3 \times 3 \text{ mm}^2$ festgelegt wurde, wird die experimentell bestimmte dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ auf den Bereich dieses Messfeldes begrenzt und liegt damit unter der theoretisch berechneten, dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie von circa 4 mm. Aufgrund der hohen Fluktuation der einzelnen Messpunkte MP der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$, kann die Theorie, dass die dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie den Glättungsverlauf Sa_n des Modells der Glättung (Gl. 5.6) steuert, angenommen werden.

Mit der theoretischen Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ und der experimentell bestimmten Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ mit zunehmendem Druckdurchgang n konnte gezeigt werden, dass das Modell der Glättung Gl. 5.6 für die Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n mit zunehmenden Druckdurchgang n gilt. Zudem zeigt sich, dass die dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ aus der Gleichung 5.6 tatsächlich der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie entspricht.

Als nächstes wird der Glättungsverlauf Sa_n der Substratopographie mit zunehmendem Druckdurchgang n bei reduziertem Glättungsfortschritt ΔSa_n untersucht. Um den Einfluss der Tintentopographie zu maximieren, wird die Nivellierungszeit t_N ausreichend herabgesetzt, sodass die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie gegen Sa_{EST0} bei einer Nivellierungszeit t_N gegen 0 Sekunden geht. Zudem ist die Tintentopographie durch die geringe Nivellierungszeit t_N maximal ausgeprägt, sodass der Einfluss der Überlagerung der Substratopographie W120, die einen Öffnungswinkel α_{open} von 120° besitzt, in Kombination mit der Tintentopographie, bei einer experimentell möglichen Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden analysiert werden kann. Für die Untersuchung wird der Versuch MOD_2.1 herangezogen. Mittels der, mit Hilfe einer Software berechneten, Fast-Fourier-Transformation wird die experimentell bestimmte Tintentopographie in ein Spektrum aus Einzelwellenlängen λ zerlegt, die die Tintentopographie unterschiedlich stark beeinflussen. Die Wellenlänge λ mit der ausgeprägtesten Amplitude a wird dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ genannt und zur Berechnung der theoretischen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} herangezogen. Zur Berechnung der theoretischen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} mit der Gleichung 5.2, wird die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST0} mit $4\text{ }\mu\text{m}$ angenommen und die experimentell ermittelten, dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,EST}$ verwendet.

Die aus den experimentellen Versuchen variierende dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ variiert im Bereich von $589\text{ }\mu\text{m}$ bis hin zu $594\text{ }\mu\text{m}$. Lediglich der erste Messpunkt MP 1 weicht mit einer dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ von $1480\text{ }\mu\text{m}$ stark ab. Diese Varianz wirkt sich auf die mit der Gleichung 5.2 theoretisch berechnete arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie aus. Die nach der Gleichung 5.2 des Modells der Tintentopographie berechnete, theoretische arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} liegt im Mittel bei $3,60 \pm 0,20\text{ }\mu\text{m}$. Die experimentell ermittelte arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt im Mittel bei $3,66 \pm 0,04\text{ }\mu\text{m}$. Die experimentellen Werte der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} stimmen mit den theoretisch berechneten Werten der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} größtenteils überein, Tab. 5-3.

Tabelle 5-3: Verifizierung der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einem Schichtauftrag h von $15\ \mu\text{m}$ anhand dem experimentellen Versuch MOD_2.1 und den mit der Gleichung (5.2) theoretisch berechneten arithmetischen Mittenrauheiten Sa_{EST} mit der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ aus den experimentellen Versuchen und einer arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST0} anhand von 5 Messungen MP.

MOD_2.1	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	Mittelwert MW
Exp. $\lambda_{dom,EST}$ in μm	1480	593	589	594	593	769 ± 355
Exp. Sa_{EST} in μm	3,58	3,64	3,68	3,68	3,70	$3,66 \pm 0,04$
Theor. Sa_{EST} in μm	3,99	3,50	3,49	3,50	3,50	$3,60 \pm 0,20$

Der Glättungsverlauf Sa_n des Modells der Glättung (Gl. 5.6) bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden wird mit dem Versuch MOD_1.1 untersucht.

Der experimentelle Glättungsverlauf Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n deckt sich mit dem theoretischen Verlauf des Modells der Glättung (Gl. 5.6). Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 der definierten Substrattopographie, auf die die Tinte aufgebracht wird, liegt im Mittel bei $29,4 \pm 0,9\ \mu\text{m}$, Abb. 5-10. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt mit zunehmendem Druckdurchgang n exponentiell ab. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge n eine starke Glättung erfolgt. Die Tinte fließt stärker in die Täler der Substrattopographie. Ab dem sechsten Druckdurchgang reduziert sich die arithmetische Mittenrauheit Sa_n langsamer bis sie ab dem zehnten Druckdurchgang stagniert. Es stellt sich ein Gleichgewicht um die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} von $3,5 \pm 0,2\ \mu\text{m}$ ein.

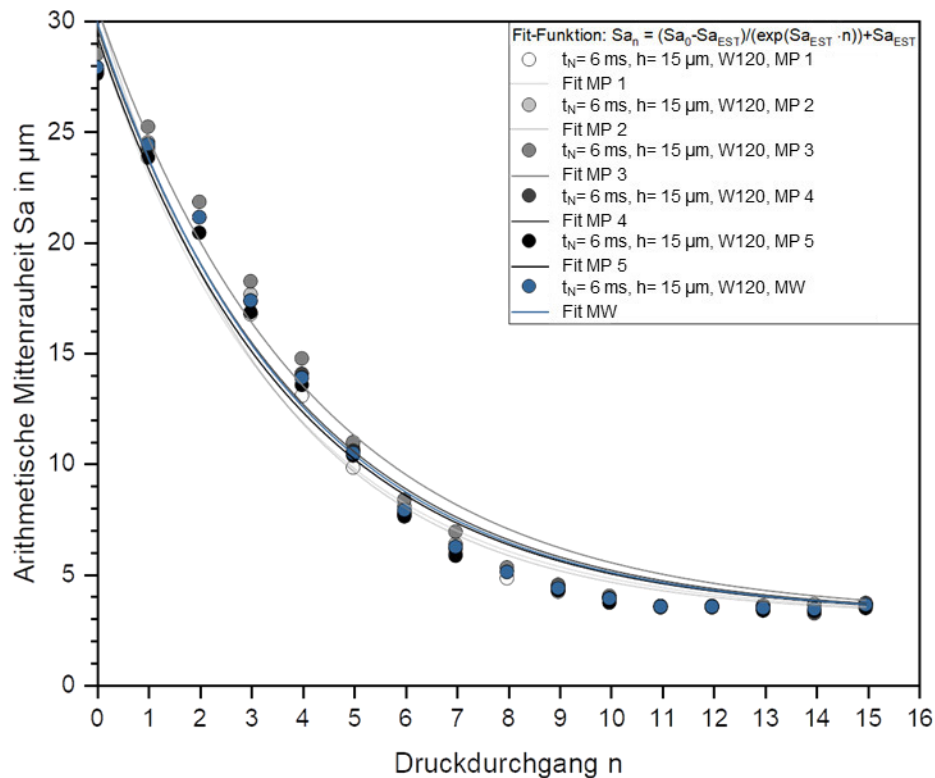


Abbildung 5-10: Arithmetische Mittenrauheit Sa_n in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einem Schichtauftrag h von 15 μm und die Verifizierung des theoretischen Modells der Glättung (Gl. 5.6) anhand der Fitfunktion. (Versuch MOD_1.1)

Die Betrachtung der dominierende Wellenlänge λ_{dom} nach jedem Druckdurchgang n mittels der, mit Hilfe einer Software berechneten, Fast-Fourier-Transformation, spiegelt die Veränderung der dominierenden Wellenlänge λ_{dom} während des Glättungsverlaufs Sa_n wider. Der Vergleich dieser experimentellen dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,exp}$ mit den theoretischen dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,theor}$ aus der Fitfunktion nach Gleichung 5.6 gibt Aufschluss darüber, ob der Verlauf der Glättung mit der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie, oder der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,S}$ der Substrattopographie einhergeht. Diese wird durch einen Sprung der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,exp}$ ausgezeichnet, die durch die Druckdurchgänge n verändert wird. Die Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$, die das Modell der Glättung (Gl. 5.6) beeinflusst, wird durch die Fitfunktion auf Basis des Modells ermittelt.

Die experimentelle dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,exp}$ liegt bis zum neunten Druckdurchgang konstant bei $0,39 \pm 0,01 \text{ mm}$, Abb. 5-11. Die definierte Zahnstruktur der Substrattopographie besitzt bis zum neunten Druckdurchgang ausgeprägte Spitzen in der Topographiedarstellung. Ab dem zehnten Druckdurchgang schwächen die vorher klar erkennbaren Spitzen der

definierten Zahnstruktur der Substrattopographie ab, wodurch die anfänglich dominierende Substrattopographie der nun dominierenden Tintentopographie weicht. Dies zeigt sich zusätzlich in dem Sprung der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,exp}$, die von $0,39 \pm 0,01$ mm auf $0,56 \pm 0,09$ mm ansteigt. Dieser Sprung deutet an, dass sich die dominierenden Verhältnisse der Substrattopographie zur Tintentopographie umverlangert haben und die dominierende Wellenlänge λ_{dom} ab diesem Druckdurchgang aus der Tintentopographie abgeleitet wird. Die theoretische Wellenlänge $\lambda_{dom,theor}$, die sich aus der Fitfunktion auf Basis des Modells der Glättung (Gl. 5.6) ergibt, liegt bei $0,53 \pm 0,01$ mm und befindet sich im Bereich der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,exp}$, die demzufolge der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ entspricht. Es bestätigt die Theorie, dass das Modell der Glättung (Gl. 5.6) durch die Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie wesentlich bestimmt wird.

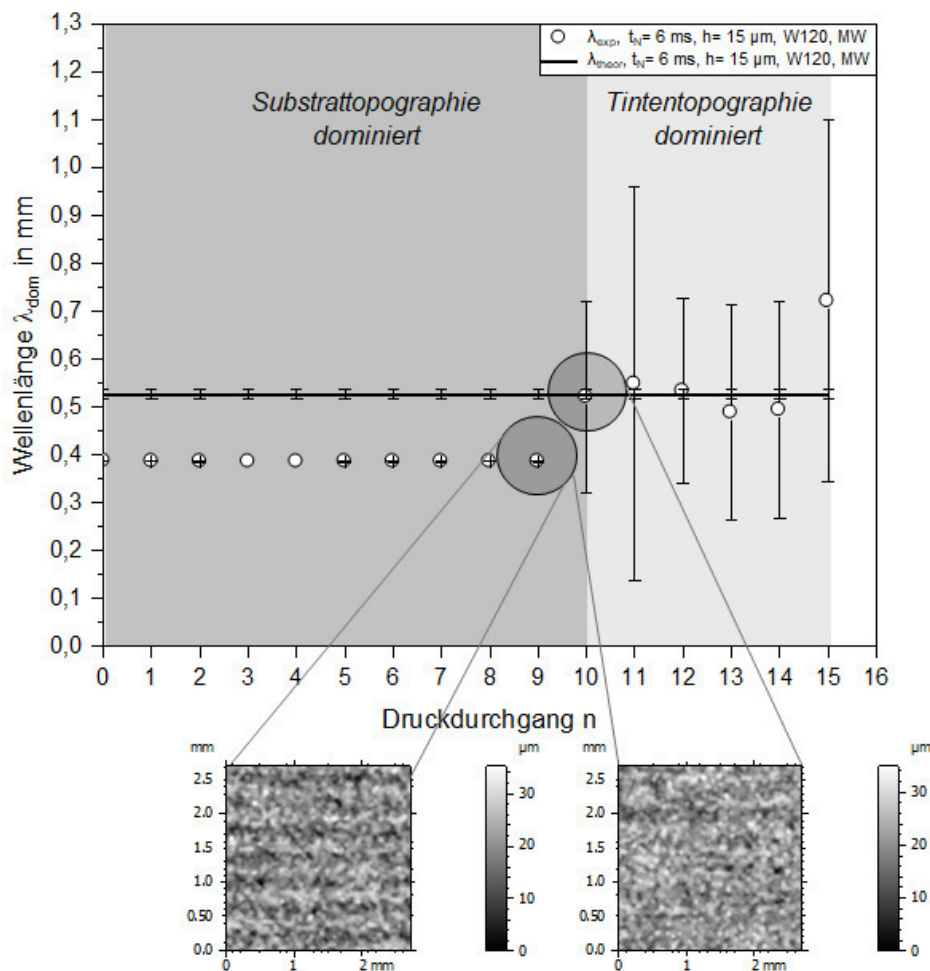


Abbildung 5-11: Experimentell ermittelte, dominierende Wellenlänge λ_{dom} aus der Fast-Fouriertransformation und die theoretisch berechnete Wellenlänge λ_{dom} (Gl. 5.6) aus der Fitfunktion in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden. Unten: Topographieaufnahmen aus der Konfokalmikroskopie mit links dominierender Substrattopographie und rechts dominierender Tintentopographie. (Versuch MOD_1.1)

Abbildung 5-11 zeigt in der graphischen Darstellung der dominierenden Wellenlänge λ_{dom} pro Druckdurchgang n , dass im Bereich der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie ab dem zehnten Druckdurchgang eine stärkere Fluktuation um den Mittelwert MW auftritt.

Die experimentelle, dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie, die aus dem Mittelwert der einzelnen Messpunkte MP ab dem zehnten Druckdurchgang bis zum 15. Druckdurchgang gebildet werden, liegen nahe beieinander. Die Betrachtung der zugehörigen Standardabweichungen zeigt jedoch, dass sich innerhalb der Druckdurchgänge eine starke Fluktuation der dominierenden Wellenlängen $\lambda_{dom,EST}$ einstellt. Die experimentelle, dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ der Tintentopographie liegt mit einem Mittelwert MW von $0,56 \pm 0,09$ mm geringfügig über dem Mittelwert MW der theoretischen, dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$. Diese besitzt einen Mittelwert MW von $0,53 \pm 0,01$ mm und wird aus der Fitfunktion auf Basis der Gleichung 5.6 der fünf Messpunkte MP ermittelt. Die Einzelergebnisse aus der Fitfunktion für die theoretische, dominierende Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ fluktuiert nur unwesentlich um den Wert aus der Fitfunktion, Tab. 5-4.

Tabelle 5-4: Verifizierung der dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ des Glättungsverlaufs Sa_n bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einem Schichtauftrag h von $15 \mu\text{m}$ anhand der experimentellen Versuche aus dem Versuch MOD_1.1 und den mit der Gleichung 5.6 theoretisch berechneten dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ aus der Fitfunktion auf Basis der einzelnen Messpunkte MP und der experimentellen dominierenden Wellenlänge $\lambda_{dom,EST}$ anhand von 5 Messungen MP. Der Mittelwert MW ergibt sich aus den Messwerten der fünf Messpunkte MP.

MOD_1.1	MP 1	MP 2	MP 3	MP 4	MP 5	Mittelwert MW
Exp. $\lambda_{dom,EST}$ in mm	$0,497 \pm 0,25$	$0,525 \pm 0,23$	$0,516 \pm 0,21$	$0,598 \pm 0,39$	$0,520 \pm 0,23$	$0,557 \pm 0,09$
Theor. $\lambda_{dom,EST}$ in mm	$0,513 \pm 0,01$	$0,504 \pm 0,01$	$0,533 \pm 0,01$	$0,529 \pm 0,01$	$0,524 \pm 0,01$	$0,526 \pm 0,01$

Das Modell der Glättung (Gl. 5.6) basiert auf der Annahme, dass sich die Tintentopographie und die Substratopographie überlagern. Diese Annahme wird unter Betrachtung der Profilquerschnitte anhand von REM Aufnahmen nach dem zweiten und fünften Druckdurchgang bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und 60 Sekunden untersucht.

Die Tinte fließt bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden vollständig in die Täler und bildet dort einen Meniskus aus. Die einzelnen Druckpunkte sind nicht mehr erkennbar, wodurch sich keine Tintentopographie erkennbar ist. Die Spitzen von der Zahnstruktur der Substratopographie sind klar erkennbar, Abb. 5-12b. Nach fünf Druckdurchgängen mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden ist die Substratopographie vollständig gefüllt, da die gesamte Tinte in die Täler geflossen ist. Die Tintentopographie zeichnet sich weiterhin nicht ab, Abb. 5-12d. Die Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden reicht aus, dass die Tinte in die

Fließbewegung übergeht, jedoch nicht vollständig in die Täler fließt. In den Tälern befindet sich mehr Tinte als auf den Spitzen. Im Vergleich zu einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden wird ersichtlich, dass sich einzelne Druckpunkte abzeichnen und deformiert vorliegen. Die Druckpunkte sind nicht vollständig nivelliert und die Substrattopographie formt sich deutlich ab, Abb. 5-12a. Aufgrund der geringen Fließbewegung, bildet sich nach dem fünften Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden weiterhin die Substrattopographie ab. Die Tintentopographie tritt jedoch stärker in den Fokus, Abb. 5-12c.

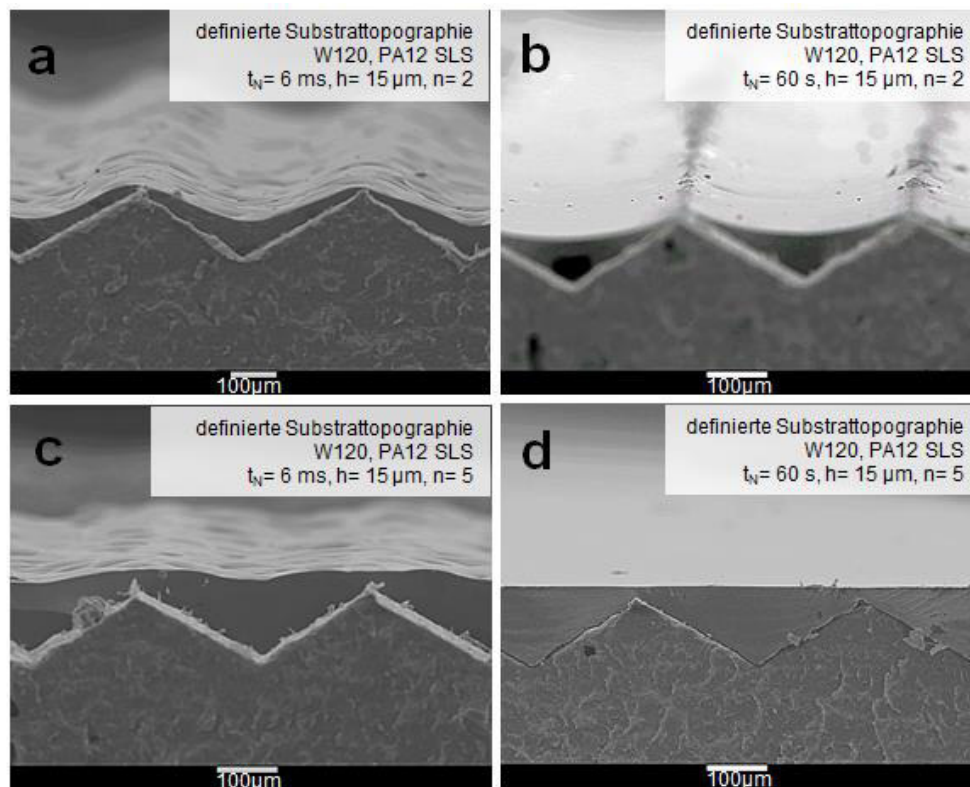


Abbildung 5-12: REM Aufnahmen der definierten Substrattopographie W120 mit einer aufgedruckten mittleren Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ pro Druckdurchgang mit a) einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden nach dem zweiten Druckdurchgang, b) einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden nach dem zweiten Druckdurchgang, c) einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden nach dem fünften Druckdurchgang und d) einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden nach dem fünften Druckdurchgang.

Die REM Aufnahmen zeigen, dass sich die Substrattopographie und die Tintentopographie überlagern. In beiden Fällen sagt das Modell der Glättung (Gl. 5.6) den Glättungsverlauf Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n voraus. Die Modellvorstellung der Glättung repräsentiert, neben der idealen Füllung der Substrattopographie, auch die überlagerte Struktur der Substrattopographie und der Tintentopographie.

5.1.4 Validität des Modells

Das Modell der Glättung (Gl. 5.6) wurde durch die Versuche MOD_1.1, MOD_1.2, MOD_2.1 und MOD_2.2 mit einem durchschnittlichen Tropfenvolumen von $12 \cdot 10^3\text{ }\mu\text{m}^3$ und einer Druckauflösung von $600 \times 600\text{ dpi}$ validiert. Aus dem durchschnittlichen Tropfenvolumen

ergibt sich, in Annäherung an einen ideal runden Zustand, ein Tropfenradius von 14 μm . Der Druckpunkt Abstand d entspricht circa 42 μm . Wird die Auflösung verändert, ändert sich der Druckpunkt Abstand. Dies wirkt sich auf die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie aus, die den Glättungsverlauf Sa_n beeinflusst. Zusätzlich kann ein verändertes Tropfenvolumen die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie verändern. Der Glättungsverlauf Sa_n mit diesen veränderten Variablen wird dem Glättungsverlauf Sa_n nach dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) entsprechen. Dennoch müssen diese Parameter zusätzlich überprüft werden.

Liegt die Kapillarlänge κ^{-1} unter der Wellenlänge λ , überwiegt die Viskositätskraft im System und das Modell der Glättung (Gl. 5.6) ist gültig. Die Kapillarlänge κ^{-1} (Gl. 2.6) der verwendeten Tinte liegt theoretisch bei 1,79 m. Der Abstand der Druckpunkte entspricht der Wellenzahl k , die indirekt proportional zur Wellenlänge λ ist. Entspricht die Wellenlänge λ der Kapillarlänge κ^{-1} , liegt der theoretische Druckpunkt Abstand bei 3,51 Metern. Der Druckvorgang druckt hingegen mit einem Druckpunkt Abstand im Mikrometerbereich. Unter der Annahme, dass der Tropfen spreitet und somit eine Länge von 1,79 Meter benetzt, und dieser eine vernachlässigbar geringe Krümmung annimmt, kann die theoretische Schichtdicke h mittels der Fläche A pro Wellenlänge λ berechnet werden. Daraus folgt eine theoretische Schichtdicke h von circa 34 nm. Da die Oberflächenspannung σ_T dieses verhindert, ist es unwahrscheinlich, dass die Länge von 1,79 Meter erreicht wird.

Demzufolge wird die Kapillarlänge κ^{-1} der Tinte die Wellenlänge λ zu keinem Zeitpunkt übersteigen. Dadurch überwiegt zu jeder Zeit die Viskositätskraft, auf der das Modell der Glättung (Gl. 5.6) basiert. Dies bestätigt sich im Vergleich dieser beiden Parameter. Die Kapillarlänge κ^{-1} von 1,79 Metern wird zu keiner Zeit erreicht. Aus diesem Grund muss die Wellenlänge λ mit einer Potenz von 4 in die Gleichung 5.6 des Modells der Glättung eingehen, woraus folgt, dass das Modell der Glättung (Gl. 5.6) gültig ist.

5.1.5 Quintessenz

Das Modell der Glättung (Gl. 5.6) simuliert den Glättungsverlauf Sa_n der arithmetischen Mittenrauheit in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n von rauen Substratopographien durch das Überdrucken von Tinte mit zunehmendem Druckdurchgang n und setzt sich aus der Überlagerung von zwei Topographien, der Substratopographie und der Tintentopographie, zusammen. Die Tintentopographie bildet die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} , die sich nahezu exponentiell mit der Nivellierungszeit t_N reduziert. Dieser Wert ist im Modell der Glättung (Gl. 5.6) ein statischer Wert, da die Tintentopographie zu einer definierten Nivellierungszeit t_N daran gehindert wird, ihre Gestalt weiter zu verändern. Wie stark sich die Gestalt bis dahin verändert, liegt an der anfänglichen Struktur der Tinte, die sich mit der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST0} beschreiben lässt. Die Glättung der Substratopographie folgt ebenfalls einem exponentiellen Verlauf. Im Gegensatz zur Tintentopographie ist dieser

Ablauf dynamisch, da mit jedem weiteren Druckdurchgang n der Glättungsfortschritt exponentiell abnimmt. Limitiert wird dieses Verhalten von der Tintentopographie, die die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} repräsentiert. Diese stellt sich ein, sobald die Substrattopographie vollständig mit Tinte aufgefüllt wurde und somit die arithmetische Mittenrauheit Sa_0 der Substrattopographie geringer als die Tintentopographie ist.

Der anfangs homogene Schichtauftrag h des Inkjet-Drucks bestätigt die Validität des Modells der Glättung (Gl. 5.6), gibt jedoch keine Auskunft über die exakte Materialverteilung auf der rauen Substrattopographie.

5.2 Modellbildung der partiellen Materialverteilung

Neben dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) ist die partielle Materialverteilung der Tinte auf der Substrattopographie von Interesse, da die maximale Schichtdicke h_{Tal} in den Tälern und die minimale Schichtdicke h_{Spitze} auf den Spitzen für einen eintretenden Glättungsverlauf Sa_n essentiell ist. Zudem spielt die exakte Schichtdicke h_{Tal} im Tal eine wichtige Rolle, da die Strahlungsleistung und Intensität der UV-Einheit im Inkjet-Drucker auf eine homogene, partielle Materialverteilung der gedruckten Schichtdicke h abgestimmt ist. Eine Erhöhung der Schichtdicke h_{Tal} im Tal beeinflusst gegebenenfalls die Aushärtung der Tinte im Tal. Aus diesem Grund ist eine exakte Bestimmung der Schichtdicke h_{Tal} im Tal von großer Bedeutung. In den folgenden Unterkapiteln wird das Modell auf Basis der Rauheitskennwerte hergeleitet und im Anschluss die Ergebnisse verifiziert und validiert. Den Abschluss bildet die Quintessenz zu dem Modell der partiellen Materialverteilung.

Da sich die Messpunkte MP auf der Fläche befinden, wird in dem Modell die Kantenflucht, die sich in den Randbereichen einstellt, nicht berücksichtigt.

5.2.1 Modellentwicklung

Die partielle Materialverteilung gibt zum einen Aufschluss über die lokale Schichtdicke auf den Spitzen und in den Tälern der Substrattopographie und zum anderen kann der Stand des Glättungsverlaufs Sa_n bestimmt werden, da eine gleichmäßige Schichtdicke auf den Spitzen und in den Tälern auf das Ende des Glättungsverlaufs Sa_n hinweist.

Auf die Substrattopographie wird homogene Tinte in definierter Schichtdicke h gedruckt. Diese Schichtdicke h liegt anfangs gleichmäßig verteilt auf der Substrattopographie vor. Die Spitzen der Substrattopographie besitzen zu einem Zeitpunkt t_N von null Sekunden eine Schichtdicke $h_{Spitze0}$, die identisch zur Schichtdicke h_{Tal0} in den Tälern ist. Die Gravitationskraft und die Viskositätskraft, sowie der Neigungswinkel β_{tilt} der Topographie lassen die Tinte von den Spitzen in Richtung der Täler fließen. Das Fließen reduziert die anfängliche Schichtdicke $h_{Spitze0}$ auf der Spitze um die Schichtdickendifferenz Δh . Es bildet sich eine neue Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze aus. Im gleichen Maße wird die Schichtdicke h_{Tal0} im Tal um

die Schichtdickendifferenz Δh erhöht und es bildet sich eine neue Schichtdicke h_{Tal} aus. Während sich auf den Spitzen der Substrattopographie nach einer Nivellierungszeit t_N größer null Sekunden nahezu keine Tinte mehr befindet, liegt im Tal der Substrattopographie lokal die größte Schichtdicke h_{Tal} der Substrattopographie vor. Zwischen diesen beiden lokalen Extrempunkten nimmt die Schichtdicke h der Tinte ausgehend von der Spitze der Substrattopographie in Richtung des Tals zu, bis die Schichtdicke h_{Tal} im Tal erreicht wurde, Abb. 5-13.

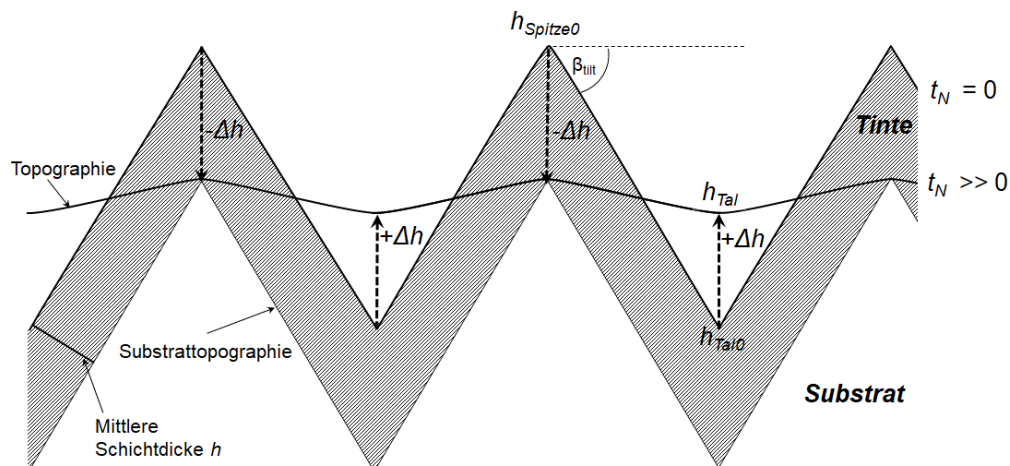


Abbildung 5-13: Vereinfachte schematische Darstellung der Materialverteilung mit zunehmender Nivellierungszeit t_N . Die anfangs homogene Schichtdicke h , die auf den Spitzen ($h_{Spitze0}$) wie auf den Tälern (h_{Tal0}) vorhanden ist, nimmt mit zunehmender Nivellierungszeit t_N aufgrund des Neigungswinkels β_{tilt} der Substrattopographie, und den wirkenden Kräften auf den Spitzen ab und bildet die dynamische Schichtdicke h_{Spitze} . In den Tälern bildet sich die dynamische Schichtdicke h_{Tal} aus.

Die Spitzen und die Täler der Substrattopographie sind die kritischen Extrempunkte in dem Profilausschnitt und werden im Modell der partiellen Materialverteilung näher betrachtet.

In der vereinfachten, zweidimensionalen Betrachtung des Profilausschnitts, befindet sich bei einer Nivellierungszeit t_N von null Sekunden eine homogene Schichtdicke h auf der gesamten Substrattopographie vor. Mit zunehmender Nivellierungszeit reduziert sich die Tinte an der Spitze der Substrattopographie um die Schichtdickendifferenz Δh . Die Schichtdickendifferenz Δh , die von der Spitze abfließt, splittet sich in zwei Teilschichtdicken $h/2$, da die Tinte in zwei unterschiedliche Richtungen abfließt, Abb. 5-14. Die Umverteilung der Tinte von der einen Spitze in die beiden umliegenden Täler bewirkt, dass die eine Teilschichtdicke $h/2$ die Schichtdicke h_{Tal0} des einen Tals, zusätzlich zur bereits vorhandenen Schichtdicke h , um die Teilschichtdicke $h/2$ erhöht. Die zweite Spitze, die das Tal bildet, speist ebenfalls eine Teilschichtdicke $h/2$ in das Tal ein. Die Schichtdicke h_{Tal0} im Tal nimmt damit insgesamt um die Schichtdickendifferenz Δh zu. Aufgrund der Materialverteilung ändert sich die Topographie im Vergleich zur Substrattopographie. Diese Topographieveränderung wirkt sich auf die Rauheit Rz des Profilausschnitts aus. Die Rauheit Rz der Substrattopographie umfasst den

Bereich zwischen der Spitze und dem Tal. Bei einer Nivellierungszeit t_N von null Sekunden ist diese Rauheit maximal. Die Umverteilung der Tinte während dem Nivellierungsprozess reduziert die Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze und erhöht die Schichtdicke h_{Tal} im Tal. Es bildet sich eine neue Topographie aus, deren Spitzen und Täler einen kleineren Bereich umfassen. Die anfängliche Rauheit Rz_0 reduziert sich auf die Rauheit Rz_t . Diese Abnahme wird Rauheitsdifferenz ΔRz genannt, Abb. 5-14.

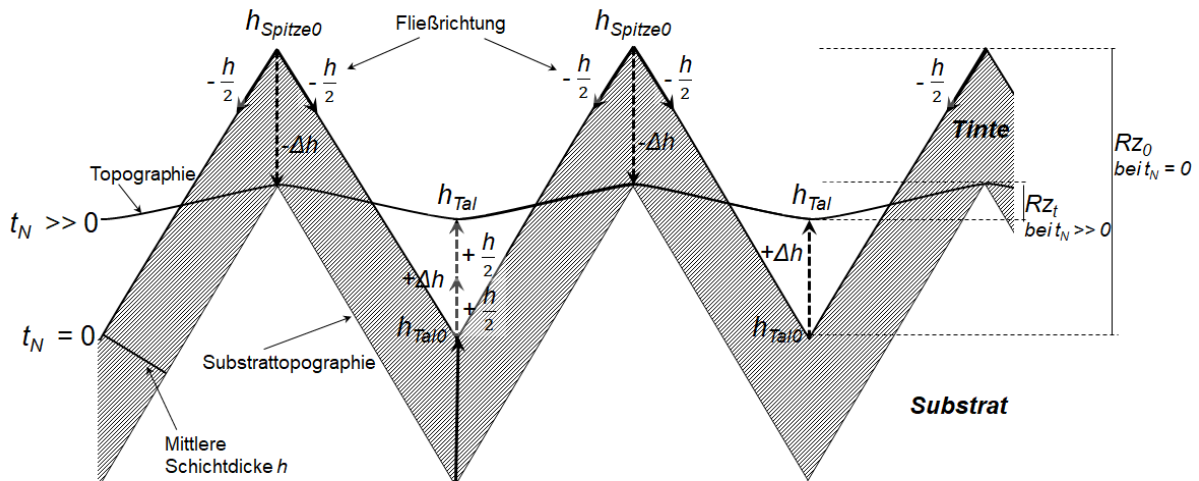


Abbildung 5-14: Vereinfachter schematischer Prozess der Glättung durch die partielle Materialverteilung der Tinte auf der Substratopographie mit zunehmender Nivellierungszeit t_N . Schichtdicke auf der Spitze h_{Spitze} nimmt ab während die Schichtdicke h_{Tal} im Tal zunimmt. Daraus resultiert eine Veränderung der Topographie, die eine Veränderung der Rauheit Rz_t bewirkt.

Die Schichtdickendifferenz Δh , die die Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze während dem Nivellierungsprozess reduziert, steht im Gleichgewicht mit der Schichtdickendifferenz Δh , die die Schichtdicke h_{Tal} im Tal während dem Nivellierungsprozess erhöht. Die Rauheit Rz entspricht bei einer gleichmäßigen Substratopographie dem betragsmäßigen Abstand des Maximums und des Minimums der Topographie. Die gleichmäßige Umverteilung der Tinte von den Spitzen in die Täler bewirkt, dass die Rauheit Rz im gleichen Maße von der Abnahme der Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze und der Zunahme Schichtdicke h_{Tal} im Tal profitiert und demzufolge die Rauheit Rz_0 mit zunehmender Nivellierungszeit t_N abnimmt.

Die festgelegte Nivellierungszeit t_N ermöglicht der Tinte innerhalb einer definierten Zeit von den Spitzen in die Täler zu fließen. Dieses definierte Fließen findet in jedem Druckdurchgang n statt und bildet eine neue Topographie aus. Das Überdrucken der so entstandenen Topographie verändert sich mit zunehmendem Druckdurchgang n . Gleichzeitig bedeutet dies, dass die Rauheitsdifferenz ΔRz zwischen zwei aufeinanderfolgenden Druckdurchgängen n und $n+1$ proportional zur Umverlagerung der Tinte ist. Daraus resultiert, dass die Rauheitsdifferenz ΔRz mittels der Gleichung

$$\Delta Rz = Rz_{n+1} - Rz_n \quad (5.11)$$

mit:

ΔRz	Rauheitsdifferenz zwischen zwei Druckdurchgängen n ,
Rz_{n+1}	Rauheit der $n+1$. Schicht,
Rz_n	Rauheit der n . Schicht

dargestellt werden kann. Die Rauheitsdifferenz ΔRz bedeutet, dass bei einem größeren Wert als $0 \mu\text{m}$ Tinte in das Tal geflossen ist. Es ist somit von der Schichtdicke h_{Spitze} der Spitze Tinte in das Tal geflossen und hat dort die Schichtdicke h_{Tal} erhöht. Somit ist die Rauheitsdifferenz ΔRz ein Resultat aus dem Abfließen eines bestimmten Tintenvolumens von den Spitzen und dem Auffüllen der Täler mit dem gleichen Tintenvolumen. Somit wird die Rauheitsdifferenz ΔRz im gleichen Maße von der Spitze, wie vom Tal getragen. Unter der vereinfachten Betrachtung, dass auf der gesamten Substratopographie die gleiche mittlere Schichtdicke h vorliegt, nimmt die mittlere Schichtdicke h auf einer Spitze, analog zur Schichtdickendifferenz Δh , um die halbe Rauheitsdifferenz $\Delta Rz/2$ in eine Fließrichtung ab. Die vereinfachte Betrachtung basiert auf der Annahme, dass die Substratopographie mit einer Sinusfunktion beschrieben werden kann, die einen homogenen Schichtauftrag unterstützt. Daraus kann der Zusammenhang der Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze und der Rauheitsdifferenz ΔRz mit der Gleichung

$$h_{\text{Spitze}} = h - \frac{\Delta Rz}{2} \quad (5.12)$$

mit:

ΔRz	Rauheitsdifferenz zwischen zwei Druckdurchgängen n ,
h_{Spitze}	Schichtdicke auf der Spitze,
h	mittlerer Schichtdicke

und die Schichtdicke h_{Tal} im Tal mit der Gleichung

$$h_{\text{Tal}} = h + \frac{\Delta Rz}{2} \quad (5.13)$$

mit:

ΔRz	Rauheitsdifferenz zwischen zwei Druckdurchgängen n ,
h_{Tal}	Schichtdicke im Tal,
h	mittlerer Schichtdicke

abgeleitet werden. Die daraus resultierenden Schichtdicken h_{Spitze} und h_{Tal} beschreiben die Schichtdicke auf den Spitzen und in den Tälern pro Druckdurchgang. Die gesamte Schichtdicke h_{ges} ermittelt sich aus der Addition der einzelnen Schichtdicken h_{Spitze} (Gl. 5.12) und h_{Tal} (Gl. 5.13) aus den durchgeführten Druckdurchgängen. Dieses wird durch die Gleichung

$$h_{\text{ges,Spitze}} = \sum_1^n h_{\text{Spitze}} \quad (5.14)$$

mit:

$h_{\text{ges,Spitze}}$	gesamte Schichtdicke nach n Druckdurchgängen auf der Spitze,
h_{Spitze}	Schichtdicke auf der Spitze pro Druckdurchgang,
n	Anzahl der Druckdurchgänge

für die Gesamtschichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze und der Gleichung

$$h_{ges,Tal} = \sum_1^n h_{Tal} \quad (5.15)$$

mit:

$h_{ges,Tal}$	gesamte Schichtdicke nach n Druckdurchgängen in dem Tal,
h_{Tal}	Schichtdicke im Tal pro Druckdurchgang,
n	Anzahl der Druckdurchgänge

für die Gesamtschichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal beschrieben.

Das Modell der partiellen Materialverteilung entspricht der Schichtdicke h_{Spitze} auf den dominierenden Spitzen der Substrattopographie nach Gleichung 5.12 und der Schichtdicke h_{Tal} im Tal in den dominierenden Tälern der Substrattopographie nach Gleichung 5.13, nachdem die Tinte eine definierte Zeit t_N pro Druckdurchgang fließen konnte. Eine ganzheitliche Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze und $h_{ges,Tal}$ in den Tälern kann durch die Summe der einzelnen Schichtdicken h_{Spitze} und h_{Tal} pro Druckdurchgang (Gl. 5.14 und Gl. 5.15) berechnet werden.

5.2.2 Modellverifizierung

Die partielle Materialverteilung ist eine Methode, die Schichtdicken auf den Spitzen und in den Tälern der Substrattopographie vorherzusagen, ohne das Substrat zu zerstören. Anhand der partiellen Materialverteilung kann, im Gegensatz zu den REM Aufnahmen, eine Aussage über die Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze und der Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie nach jedem einzelnen Druckdurchgang n getroffen werden. Zudem kann der Stand des Glättungsfortschritts mit diesem Modell diskutiert werden. Die Verifizierung der Schichtdicke h_{Spitze} und h_{Tal} nach dem Modell der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13) bei zunehmendem Druckdurchgang n erfolgt mittels experimentellen Untersuchungen nach den Versuchen MOD_1.1 und MOD_1.2, sowie den REM Aufnahmen ausgewählter Profilausschnitte.

Die geringe Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden verhindert übermäßiges Abfließen der Tinte in die Täler. Die Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden reicht jedoch aus, um die Tinte zum Fließen zu bringen. Dies zeigt sich in der heterogenen Materialverteilung auf den Spitzen und in den Tälern, Abb. 5-15. Der homogene Schichtauftrag liegt bei einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm pro Druckdurchgang. Aufgrund des Fließverhaltens der Tinte liegt die Schichtdicke h_{Tal} nach dem ersten Druckdurchgang im Tal zunächst mit einer Schichtdicke h_{Tal} von 29 μm über diesem Wert. Dementsprechend liegt der Wert der Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze mit einer Schichtdicke h_{Spitze} von 1 μm unter dem Wert der mittleren Schichtdicke h , was auf das Abfließen der Tinte von den Spitzen zurückzuführen ist. Die Materialverteilung der Tinte auf der Topographie reduziert sich nach dem zweiten Druckdurchgang. Die neu aufgetragene Schichtdicke h_{Tal} im Tal liegt bei 22 μm und die Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze liegt bei 8 μm . Nach dem dritten Druckdurchgang findet kaum eine Materialverteilung der Tinte zugunsten des Tals statt. Nach diesem

Druckdurchgang befindet sich eine Schichtdicke h_{Tal} im Tal von 17 μm und eine Schichtdicke h_{Spitze} auf den Spitzen von 13 μm . Vermutlich liegt die Abweichung der beiden Schichtdicken nach diesem Druckdurchgang an einem Messfehler eines einzelnen Messpunktes, der den gebildeten Mittelwert verfälscht. Die Materialverteilung ist in den Druckdurchgängen vier bis sechs ähnlich. In diesen Druckdurchgängen liegt die Schichtdicke h_{Tal} in den Tälern bei 20 μm und die Schichtdicke h_{Spitze} auf den Spitzen bei 10 μm pro Druckdurchgang. Ab dem siebten Druckdurchgang nähert sich die Materialverteilung einer homogenen Verteilung der Tinte auf der Substrattopographie weiter an. Die Schichtdicke h_{Tal} liegt innerhalb des siebten bis zum elften Druckdurchgang bei 17 μm und die Schichtdicke h_{Spitze} auf den Spitzen bei 13 μm pro Druckdurchgang. Erst nach dem zwölften Druckdurchgang ist eine konstante, homogene Materialverteilung auf den Spitzen und in den Tälern pro Druckdurchgang erreicht. Die Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und die mittlere Schichtdicke h von 15 μm reicht mit zunehmendem Druckdurchgang n nicht mehr aus, um die Tinte in die Fließbewegung zu bringen, sodass der Glättungsverlauf Sa_n ab diesem Druckdurchgang beendet ist, Abb. 5-15.

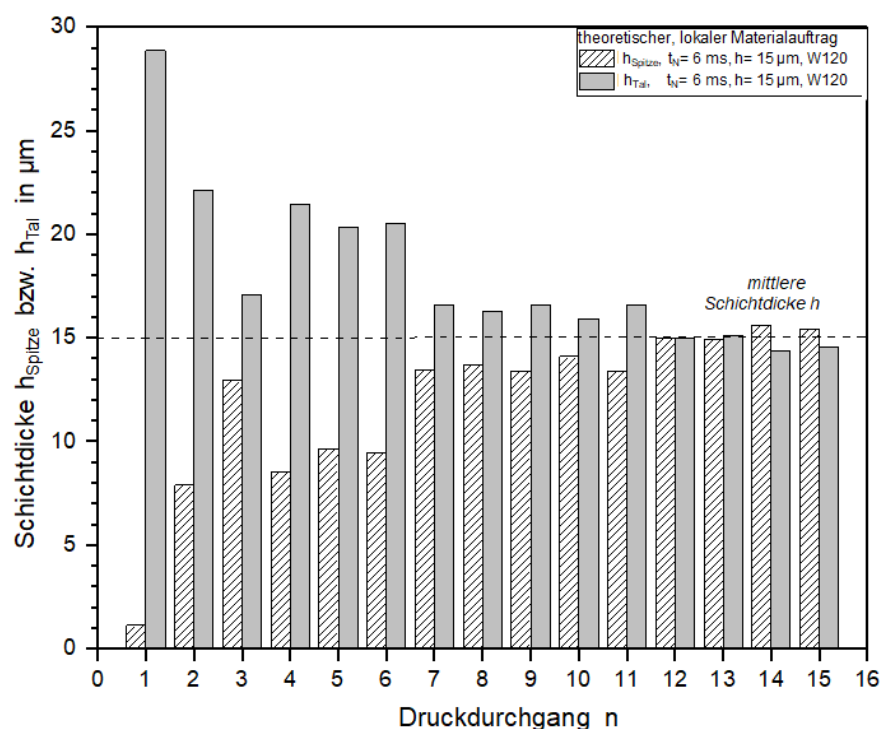


Abbildung 5-15: Theoretische Schichtdickenverteilung auf einer definierten Substrattopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n .

Mit den REM Aufnahmen aus Abbildung 5-16, die Profilausschnitte der Topographie nach unterschiedlichen Druckdurchgängen zeigen, kann stichprobenartig die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf den Spitzen und $h_{ges,Tal}$ im Tal ermittelt werden.

Nach dem ersten Druckdurchgang liegt die Materialverteilung überwiegend homogen vor. In den Tälern befindet sich eine geringfügig größere gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ als sich auf den Spitzen befindet, Abb.5-16a. Nach dem zweiten Druckdurchgang prägt sich die heterogene Verteilung der Tinte auf der Substrattopographie deutlicher aus. Die größere gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal überwiegt die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf den Spitzen, die eine geringere gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ besitzt. Von der lokal geringeren Schichtdicke auf der Spitze nimmt die Schichtdicke in Richtung des Tals zu, Abb. 5-16b. Nach dem fünften Druckdurchgang ist die ursprünglich vorhandene Substrattopographie vollständig aufgefüllt. Die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf den Spitzen ist wesentlich geringer als die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal. Trotz der heterogenen Materialverteilung der Tinte auf der Substrattopographie wird die Zahnstruktur der Substrattopographie von der Tinte abgebildet, Abb.5-16c. Nach dem zehnten Druckdurchgang liegt noch eine leicht wellenförmige Topographie vor, Abb. 5-16d, die sich nach dem 15. Druckdurchgang nicht mehr signifikant verändert, Abb. 5-16e.

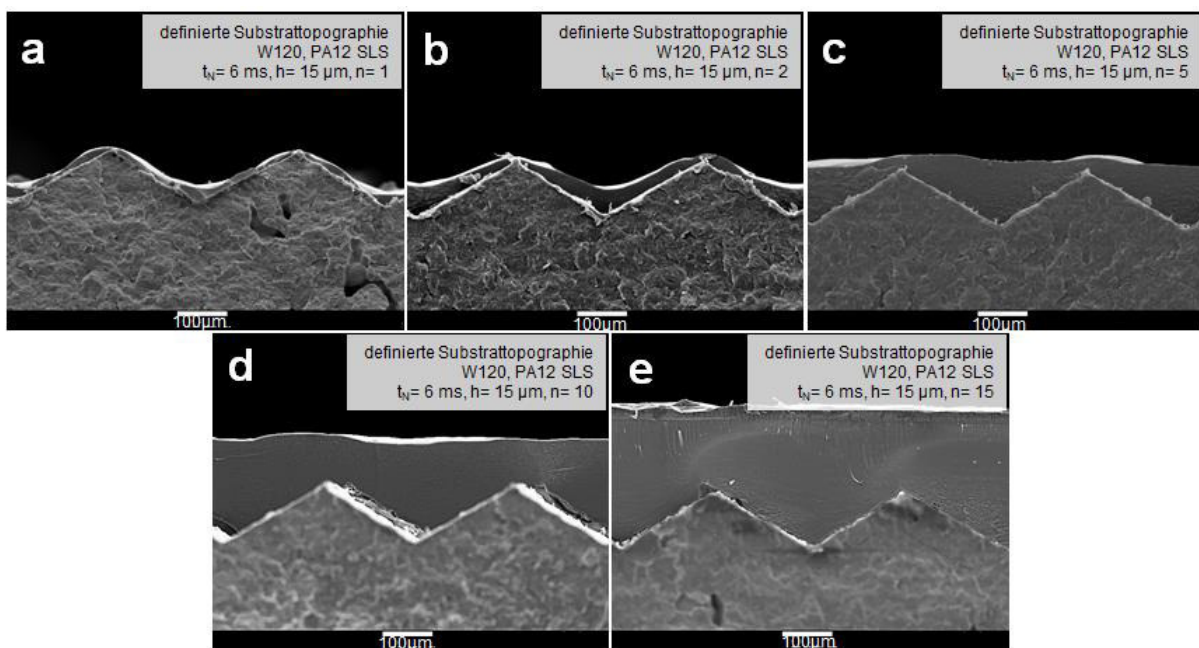


Abbildung 5-16: REM Aufnahmen einer definierten Substrattopographie W120 mit zunehmendem Druckdurchgang n bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einem Schichtauftrag von $15\ \mu\text{m}$. a) nach dem ersten Druckdurchgang, b) nach dem zweiten Druckdurchgang, c) nach dem fünften Druckdurchgang, d) nach dem zehnten Druckdurchgang und e) nach dem 15. Druckdurchgang.

Die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze und $h_{ges,Tal}$ im Tal aus den REM Aufnahmen zeigen einen identischen Verlauf zu den aufsummierten, theoretisch berechneten, gesamten Schichtdicken $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze (Gl. 5.14) und $h_{ges,Tal}$ im Tal (Gl. 5.15) nach dem Modell der partiellen Materialverteilung, Abb. 5-17.

Die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei $6\ \mu\text{m}$. Demgegenüber steht die theoretisch berechnete, gesamte

Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze mit 1 μm , Abb. 5-17. Die Differenz Δh_{ges} der theoretisch berechneten zur experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke auf den Spitzen liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei 5 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von circa 80 %. Nach dem zweiten Druckdurchgang liegt die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze bei 10 μm . Die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze liegt hingegen bei 9 μm . Die Differenz Δh_{ges} zwischen experimentell bestimmter und theoretisch berechneter, gesamter Schichtdicke entspricht 1 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 10 %. Nach dem fünften Druckdurchgang besitzt die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze einen Wert von 40 μm . Dieser Wert liegt über der experimentell bestimmten, gesamten Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze, die einen Wert von 25 μm einnimmt. Dies entspricht einer Differenz Δh_{ges} von 15 μm . Demzufolge liegt die prozentuale Abweichung bei 60 %. Nach dem zehnten Druckdurchgang erhöht sich die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze auf 90 μm . Demgegenüber steht die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze mit 104 μm . Die Differenz Δh_{ges} der theoretisch berechneten zur experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke auf den Spitzen liegt nach dem zehnten Druckdurchgang bei 14 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von circa 16 %. Nach dem 15. Druckdurchgang liegt die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze bei 161 μm . Die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze liegt hingegen bei 179 μm . Die Differenz Δh_{ges} zwischen experimentell bestimmter und theoretisch berechneter, gesamter Schichtdicke entspricht 18 μm und bedeutet eine prozentuale Abweichung von 11 %, Abb. 5-17.

Die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei 31 μm . Demgegenüber steht die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal mit 29 μm . Die Differenz Δh_{ges} der theoretisch berechneten zur experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke im Tal liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei 2 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von circa 7 %. Nach dem zweiten Druckdurchgang liegt die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal bei 49 μm . Die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal liegt hingegen bei 51 μm . Die Differenz Δh_{ges} zwischen experimentell bestimmter und theoretisch berechneter, gesamter Schichtdicke entspricht 2 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 4 %. Nach dem fünften Druckdurchgang besitzt die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal einen Wert von 110 μm . Dieser Wert liegt unter der experimentell bestimmten, gesamten Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal, die einen Wert von 129 μm einnimmt. Dies entspricht einer Differenz Δh_{ges} von 19 μm . Demzufolge liegt die prozentuale Abweichung bei 15 %. Nach dem zehnten Druckdurchgang erhöht sich die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal auf 175 μm . Demgegenüber steht die

theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal mit 196 μm . Die Differenz Δh_{ges} der theoretisch berechneten zur experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke im Tal liegt nach dem zehnten Druckdurchgang bei 21 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von circa 12 %. Nach dem 15. Druckdurchgang liegt die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal bei 271 μm . Die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal liegt identisch bei 271 μm . Die Differenz Δh_{ges} zwischen experimentell bestimmter und theoretisch berechneter, gesamter Schichtdicke entspricht null μm und bedeutet, dass keine prozentuale Abweichung vorliegt, Abb. 5-17.

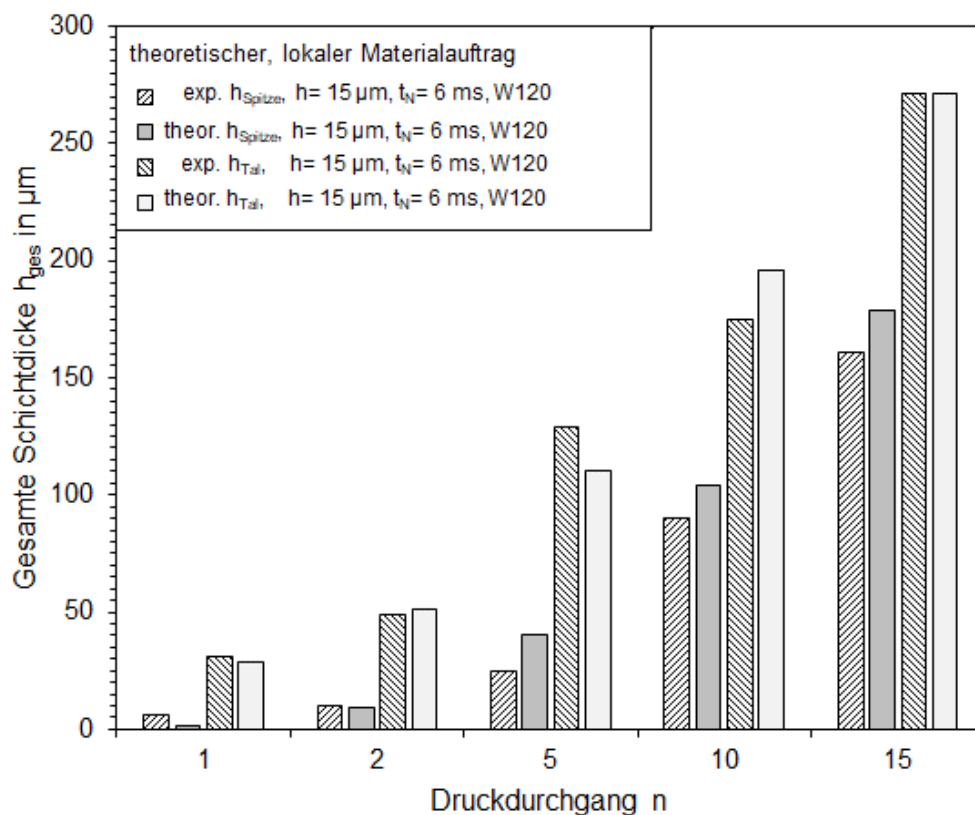


Abbildung 5-17: Vergleich der theoretischen und der experimentellen gesamten Schichtdicke h_{ges} im Tal (Gl. 5.15) und auf der Spitze (Gl. 5.14) der Zahnstruktur der Substrattopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm nach einem, zwei, fünf, zehn und 15 Druckdurchgängen.

Insbesondere in den ersten Druckdurchgängen, in denen die Schichtdicken $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze im einstelligen Mikrometerbereich liegen, wirkt sich eine geringfügige Abweichung der theoretisch berechnete gesamten Schichtdicke zur experimentell ermittelte, gesamten Schichtdicke stark aus. In Anbetracht der Ausgangsrauheit Rz_0 der Substrattopographie W120 von circa 100 μm ist diese vernachlässigbar gering. Die maximale Abweichung zwischen der theoretisch berechneten und der experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$

liegt nach dem 15. Druckdurchgang bei $18\ \mu\text{m}$ und ist in Hinblick auf die bereits aufgedruckte, gesamte Schichtdicke von circa $179\ \mu\text{m}$ vergleichsweise gering. Die maximale Abweichung zwischen der theoretisch berechneten und der experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke $h_{\text{ges},\text{Tal}}$ liegt nach dem zehnten Druckdurchgang bei $21\ \mu\text{m}$ und ist in Hinblick auf die im Tal bereits vorhandene, gesamte Schichtdicke von circa $196\ \mu\text{m}$ ebenfalls vernachlässigbar gering.

Die theoretisch berechnete gesamten Schichtdicke $h_{\text{ges},\text{Spitze}}$ auf den Spitzen und $h_{\text{ges},\text{Tal}}$ im Tal erfolgt auf Basis der Rauheit R_z , die aus einer Messfläche von $3 \times 3\ \text{mm}^2$ abgeleitet wird. In die theoretisch berechnete gesamte Schichtdicke $h_{\text{ges},\text{Spitze}}$ und $h_{\text{ges},\text{Tal}}$ gehen mehrere Spitzen und Täler der Substrattopographie W120 in die Bewertung mit ein. Hingegen beinhaltet die experimentell ermittelte, gesamte Schichtdicke $h_{\text{ges},\text{Spitze}}$ und $h_{\text{ges},\text{Tal}}$ lediglich zwei Spitzen und zwei Täler aus der REM Aufnahme. Daraus folgt, dass die Abweichung der experimentell ermittelten zur theoretisch berechneten, gesamten Schichtdicke $h_{\text{ges},\text{Spitze}}$ und $h_{\text{ges},\text{Tal}}$ zum einen an der Vermessung der Schichtdicken aus den begrenzten Profilausschnitten der REM Aufnahmen liegt. Zum anderen wird die korrekte Ermittlung der gesamten Schichtdicke $h_{\text{ges},\text{Spitze}}$ auf den Spitzen anhand der REM Aufnahmen erschwert, da die Zahnstruktur der Substrattopographie auf den Spitzen nach der Probenpräparation Ausfransungen besitzt, die den korrekten Anlegepunkt zur Vermessung erschweren. Diese Ausfransungen sind in den Tälern nicht zu finden. Liegen vereinzelt Artefakte, wie die Ausfransungen, in der Topographie vor, so werden diese innerhalb der Messfläche weniger stark gewichtet als es mit einem kleinen Ausschnitt aus den REM Aufnahme der Fall ist. Die theoretisch berechneten und experimentell bestimmten, gesamten Schichtdicken $h_{\text{ges},\text{Spitze}}$ auf der Spitze und $h_{\text{ges},\text{Tal}}$ im Tal sind, trotz ihrer zunächst groß wirkenden prozentualen Abweichungen in der Intensität des Wertes der Schichtdicken im Tal und in der Spitze gleich stark ausgeprägt und decken sich überwiegend in den Ergebnissen. Aus diesem Grund kann das Modell der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13) für eine Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden für die Berechnung der Schichtdicke herangezogen werden.

Eine Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden demonstriert den Grenzfall, in dem die gesamte Tinte von den lokalen Spitzen in die nächstgelegenen Täler fließt. Die anfangs homogene mittlere Schichtdicke h von $15\ \mu\text{m}$ ist nun ganzheitlich in den Tälern zu finden. Dies zeigt sich in der heterogenen Materialverteilung auf den Spitzen und in den Tälern, Abb. 5-18.

Der homogene Schichtauftrag liegt bei einer mittleren Schichtdicke h von $15\ \mu\text{m}$ pro Druckdurchgang. Die Schichtdicke h_{Tal} liegt nach dem ersten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst mit einer Schichtdicke h_{Tal} von $50\ \mu\text{m}$ über dem Wert der mittleren Schichtdicke h . Dementsprechend liegt der Wert der Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze mit einer Schichtdicke h_{Spitze} von null μm unter dem Wert der mittleren Schichtdicke h . Die Schichtdicke h_{Tal} im Tal übersteigt die theoretisch erreichbare, maximale Schichtdicke

h_{Tal} von 30 μm , die sich aus der anfangs aufgedruckten Schichtdicke h_{Tal} von 15 μm und der addierten Schichtdicke h_{Spitze} von 15 μm , gemäß Abbildung 5-14 des Kapitels 5.2.1, aus den beiden umliegenden Spitzen zusammensetzt. Die Materialverteilung der Tinte auf der Topographie bleibt nach dem zweiten Druckdurchgang heterogen. Die Schichtdicke h_{Tal} im Tal liegt bei 27 μm und die Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze liegt bei 3 μm . Nach dem dritten Druckdurchgang findet weiterhin die Materialverteilung zugunsten der Schichtdicke h_{Tal} im Tal statt. Nach diesem Druckdurchgang befindet sich eine Schichtdicke h_{Tal} im Tal von 26 μm und eine Schichtdicke h_{Spitze} auf den Spitzen von 4 μm . Nach dem vierten Druckdurchgang liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal bei 24 μm . Zunehmend erhöht sich die Schichtdicke h_{Spitze} auf 6 μm . Ab dem fünften Druckdurchgang nähert sich die Materialverteilung einer homogenen Verteilung der Tinte auf der Substratopographie weiter an. Die Schichtdicke h_{Tal} liegt innerhalb des fünften Druckdurchgangs bei 16 μm und die Schichtdicke h_{Spitze} auf den Spitzen bei 14 μm pro Druckdurchgang. Erst nach dem sechsten Druckdurchgang ist eine konstante, homogene Materialverteilung auf den Spitzen und in den Tälern pro Druckdurchgang erreicht. Die Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunde und die mittlere Schichtdicke h von 15 μm reicht mit zunehmendem Druckdurchgang n nicht mehr aus, um die Tinte in die Fließbewegung zu bringen. Der Glättungsverlauf Sa_n ist ab diesem Druckdurchgang beendet, Abb. 5-18.

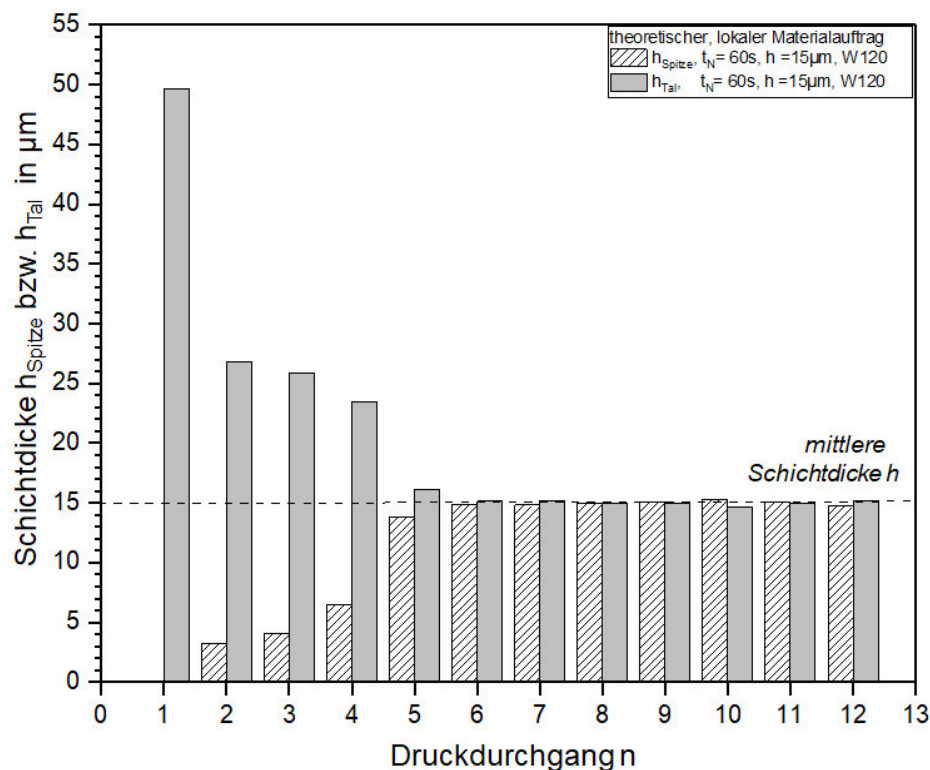


Abbildung 5-18: Theoretische Schichtdickenverteilung auf einer definierten Substratopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n .

Die Abweichung der experimentell ermittelten Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur theoretisch berechneten, maximalen Schichtdicke h_{Tal} nach Gleichung 5.13 nach dem ersten Druckdurchgang, basiert auf der vereinfachten zweidimensionalen Darstellung des Modells der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13). Das Modell der partiellen Materialverteilung, das sich auf ein zweidimensionales Abfließen der Tinte in zwei Richtungen bezieht, wurde auf ein reales dreidimensionales Bauteil übertragen. Das reale, dreidimensionale Bauteil ermöglicht ein Abfließen der Tinte in weitere Richtungen. Die Tinte wird nicht nur aus zwei Richtungen in das Tal eingespeist, sondern durch die dreidimensionale Substrattopographie drängt Tinte aus weiteren Richtungen in das Tal. Hierdurch liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal über der theoretisch berechneten, maximalen Schichtdicke h_{Tal} .

Mit den REM Aufnahmen aus Abbildung 5-19, welche Profilausschnitte der Topographie aus aufsteigenden Druckdurchgängen zeigen, kann stichprobenartig die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf den Spitzen und $h_{ges,Tal}$ im Tal ermittelt werden.

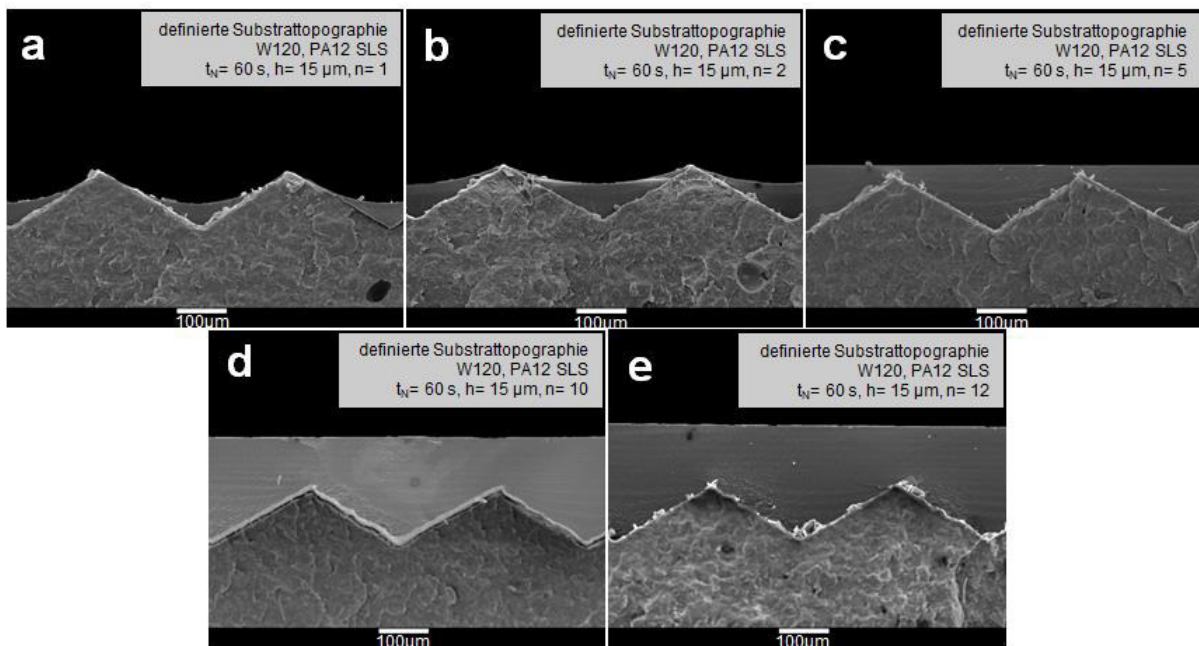


Abbildung 5-19: REM Aufnahmen zur Veränderung der Schichtdicke h mit zunehmendem Druckdurchgang n bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 15 µm. a) nach dem ersten Druckdurchgang, b) nach dem zweiten Druckdurchgang, c) nach dem fünften Druckdurchgang, d) nach dem zehnten Druckdurchgang und e) nach dem 12. Druckdurchgang.

Nach dem ersten Druckdurchgang liegt die Materialverteilung überwiegend heterogen vor. In den Tälern befindet sich die größtmögliche gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$, da sich dort die Tinte vollständig angesammelt hat. Aufgrund der Adhäsionskräfte bildet sich an den Randbereichen der Täler ein Meniskus aus. Auf den Spitzen kann keine gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ ausgemessen werden, Abb.5-19a. Nach dem zweiten Druckdurchgang prägt sich die heterogene Verteilung der Tinte auf der Substrattopographie weiter deutlich aus. Die größere

gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal überwiegt die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf den Spitzen. Von der lokal geringeren Schichtdicke auf der Spitze nimmt die Schichtdicke in Richtung des Tals zu. Der Meniskus ist weniger stark ausgeprägt. Dies ist auf den größeren Öffnungswinkel α_{open} der Substrattopographie zurückzuführen, Abb. 5-19b. Nach dem fünften Druckdurchgang, Abb. 5-19c, ist die ursprünglich vorhandene Substrattopographie vollständig aufgefüllt und es bildet sich kein Meniskus mehr aus. Die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf den Spitzen ist wesentlich geringer als die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal. Aufgrund der heterogenen Materialverteilung der Tinte auf der Substrattopographie wird die Zahnstruktur der Substrattopographie von der Tinte nicht mehr abgebildet, Abb. 5-19c. Mit zunehmenden Druckdurchgang n verändert sich die Topographie nicht mehr weiter, wie die REM Aufnahmen nach den Druckdurchgängen zehn und zwölf zeigen, Abb. 5-19d und e.

Die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei 0 μm , Abb. 5-20. Demgegenüber steht die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze mit null μm . Die Differenz Δh_{ges} der theoretisch berechneten zur experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke auf den Spitzen liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei null μm . Nach dem zweiten Druckdurchgang liegt die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze bei 2 μm . Die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze liegt hingegen bei 3 μm . Die Differenz Δh_{ges} zwischen experimentell bestimmter und theoretisch berechneter, gesamter Schichtdicke entspricht 1 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 60 %. Nach dem fünften Druckdurchgang besitzt die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze einen Wert von 28 μm . Dieser Wert liegt über der experimentell bestimmten, gesamten Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze, die einen Wert von 20 μm einnimmt. Dies entspricht einer Differenz Δh_{ges} von 8 μm . Demzufolge liegt die prozentuale Abweichung bei 39 %. Nach dem zehnten Druckdurchgang erhöht sich die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze auf 105 μm . Demgegenüber steht die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze mit 103 μm . Die Differenz Δh_{ges} der theoretisch berechneten zur experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke auf den Spitzen liegt nach dem zehnten Druckdurchgang bei 2 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 2 %. Nach dem zwölften Druckdurchgang liegt die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze bei 120 μm . Die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze liegt hingegen bei 133 μm . Die Differenz Δh_{ges} zwischen experimentell bestimmter und theoretisch berechneter, gesamter Schichtdicke entspricht 13 μm und bedeutet eine prozentuale Abweichung von 11 %, Abb. 5-20.

Die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei 44 μm , Abb. 5-20. Demgegenüber steht die theoretisch berechnete,

gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal mit 50 μm . Die Differenz Δh_{ges} der theoretisch berechneten zur experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke im Tal liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei 6 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 14 %. Nach dem zweiten Druckdurchgang liegt die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal bei 70 μm . Die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal liegt hingegen bei 76 μm . Die Differenz Δh_{ges} zwischen experimentell bestimmter und theoretisch berechneter, gesamter Schichtdicke entspricht 6 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von 9 %. Nach dem fünften Druckdurchgang besitzt die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal einen Wert von 142 μm . Dieser Wert liegt über der experimentell bestimmten, gesamten Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal, die einen Wert von 130 μm einnimmt. Dies entspricht einer Differenz Δh_{ges} von 12 μm . Demzufolge liegt die prozentuale Abweichung bei 9 %. Nach dem zehnten Druckdurchgang erhöht sich die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal auf 215 μm . Demgegenüber steht die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal mit 217 μm . Die Differenz Δh_{ges} der theoretisch berechneten zur experimentell ermittelten, gesamten Schichtdicke im Tal liegt nach dem zehnten Druckdurchgang bei 2 μm . Dies entspricht einer prozentualen Abweichung von circa 1 %. Nach dem zwölften Druckdurchgang liegt die experimentell bestimmte, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal bei 232 μm . Die theoretisch berechnete, gesamte Schichtdicke $h_{ges,Tal}$ im Tal liegt annähernd identisch bei 247 μm . Die Differenz Δh_{ges} zwischen experimentell bestimmter und theoretisch berechneter, gesamter Schichtdicke entspricht 15 μm und bedeutet eine prozentuale Abweichung von 6 %, Abb. 5-20.

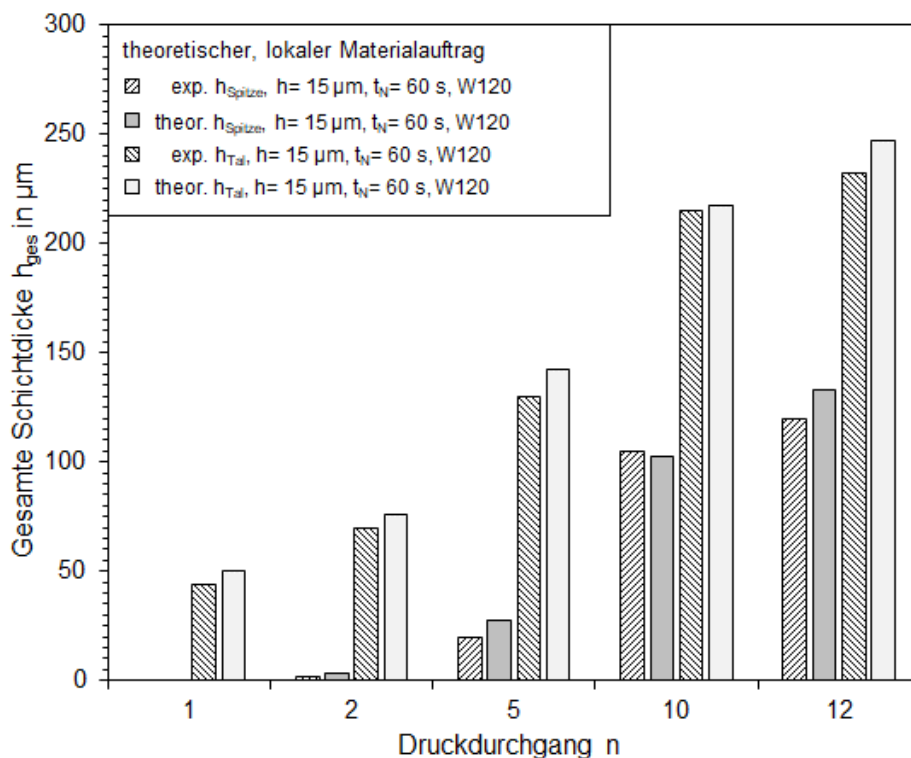


Abbildung 5-20: Vergleich der theoretischen und der experimentellen gesamten Schichtdicke h_{ges} im Tal (Gl. 5.15) und auf der Spitze (Gl. 5.14) der Zahnstruktur der Substratopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einer mittleren Schichtdicke h von $15 \mu m$ nach einem, zwei, fünf, zehn und zwölf Druckdurchgängen.

Insbesondere in den ersten Druckdurchgängen, in denen die Schichtdicken $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze im einstelligen Mikrometerbereich liegen, wirkt sich eine geringfügige Abweichung der theoretisch berechnete gesamten Schichtdicke zur experimentell ermittelte, gesamten Schichtdicke stark aus. Trotz der Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden bleibt bereits nach dem zweiten Druckdurchgang sichtlich Tinte auf den Spitzen zurück. Die theoretisch berechnete gesamten Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf den Spitzen und $h_{ges,Tal}$ im Tal erfolgt auf Basis der Rauheit R_z , die aus einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ abgeleitet wird. In die theoretisch berechnete gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ und $h_{ges,Tal}$ gehen mehrere Spitzen und Täler der Substratopographie W120 in die Bewertung mit ein. Hingegen beinhaltet die experimentell ermittelte, gesamten Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ und $h_{ges,Tal}$ lediglich zwei Spitzen und zwei Täler aus der REM Aufnahme. Daraus folgt, dass die Abweichung der experimentell ermittelten zur theoretisch berechneten, gesamten Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ und $h_{ges,Tal}$ zum einen an der Vermessung der Schichtdicken aus den begrenzten Profilausschnitten der REM Aufnahmen liegt. Zum anderen wird die korrekte Ermittlung der gesamten Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ auf den Spitzen anhand der REM Aufnahmen erschwert. Die Zahnstruktur der Substratopographie auf den Spitzen besitzt nach der Probenpräparation Ausfransungen, die den korrekten Anlegepunkt zur Vermessung erschweren. Diese Ausfransungen sind in den Tälern nicht zu

finden. Liegen vereinzelt Artefakte, wie die Ausfransungen, in der Topographie vor, so werden diese innerhalb der Messfläche weniger stark gewichtet als es in einem kleinen Ausschnitt der REM Aufnahmen der Fall ist. Die theoretisch berechneten und experimentell bestimmten, gesamten Schichtdicken $h_{ges,Spitze}$ auf der Spitze und $h_{ges,Tal}$ im Tal sind, trotz ihrer zunächst groß wirkenden prozentualen Abweichungen in der Intensität des Wertes der Schichtdicken im Tal und in der Spitze gleich stark ausgeprägt und decken sich überwiegend in den Ergebnissen. Aus diesem Grund kann das Modell der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13) für eine Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden für die Berechnung der Schichtdicke herangezogen werden.

Das Modell der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13) kann für die Bestimmung der Schichtdicke h_{Spitze} und h_{Tal} herangezogen werden. Die gesamte Schichtdicke $h_{ges,Spitze}$ und $h_{ges,Tal}$ (Gl. 5.14 und Gl. 5.15) dient der Ermittlung der Gesamtschichtdicke, die essentiell für eine ordentliche Vernetzung ist, da eine zu hohe Schichtdicke von einer konventionellen UV-Einheit nicht durchdrungen und so nicht vollständig vernetzt werden kann.

5.2.3 Validität des Modells

Das Modell der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13) gibt Auskunft über die lokale Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze der Substrattopographie und über die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie. Das Modell der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13) wurde auf Basis eines zweidimensionalen Modells entwickelt. Die Realität bezieht sich jedoch auf ein dreidimensionales Modell. Somit kann das Modell der partiellen Materialverteilung eine geringere Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie ausgeben als in Realität ermittelt wird. Insbesondere wird dieses bei ausreichender Nivellierungszeit t_N ersichtlich, da Tinte nicht nur aus zwei Richtungen in das Tal fließt, sondern umliegende Spitzen ebenfalls Tinte in das Tal einspeisen. Dadurch wird die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie in Realität höher ausfallen.

Zusätzlich gibt das Modell der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13) Auskunft über die Schichtdicken in den lokalen Minima und Maxima. Mit dem Modell kann die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie und Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze der Substrattopographie berechnet werden. Eine Aussage über die exakte Materialverteilung des gesamten Profils an jedem Ort ist mit dem Modell der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.12 und Gl. 5.13) jedoch nicht möglich. So kann der exponentielle Glättungsverlauf Sa_n der einzelnen Schichten bei einer sehr geringen Nivellierungszeit t_N , Abb. 5-21a, und einer ausreichend langen Nivellierungszeit t_N , Abb. 5-21c, mit jedem Druckdurchgang n zwischen der Spitze und dem Tal der Substrattopographie mit dem vereinfachten Modell nicht beschrieben werden, sondern kann lediglich Auskunft über den lokalen Schichtauftrag auf den Spitzen und in den Tälern der definierten Substrattopographie bei sehr geringer

Nivellierungszeit t_N , Abb. 5-21b, und einer ausreichend langen Nivellierungszeit t_N , Abb. 5-21d, mit jedem Druckdurchgang n geben.

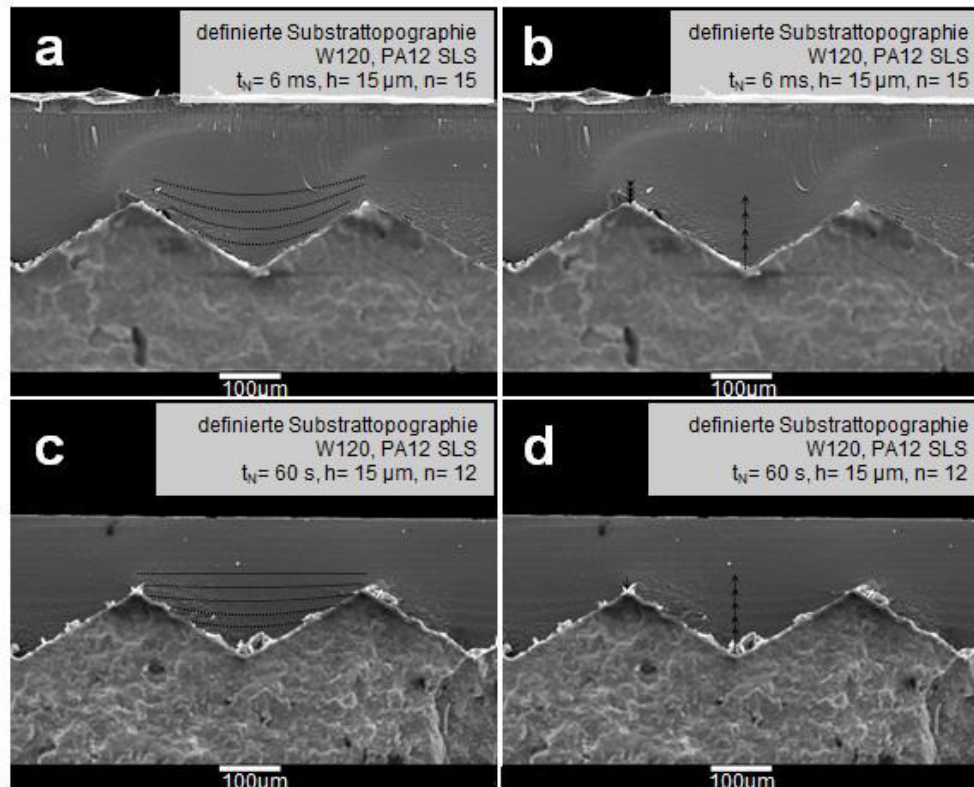


Abbildung 5-21: REM Aufnahmen der Materialverteilung a) des Topographieverlaufs nach dem 15. Druckdurchgang (Druck 15) bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden, einem Schichtauftrag h von 15 μm , b) partiell nach dem 15. Druckdurchgang bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden, einem Schichtauftrag h von 15 μm , c) des Topographieverlaufs nach dem 12. Druckdurchgang bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden, einem Schichtauftrag h von 15 μm und d) partiell nach dem 12. Druckdurchgang bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden, einem Schichtauftrag h von 15 μm .

Die Daten, die aus diesem Modell abgeleitet werden, müssen unter diesem Punkt berücksichtigt und interpretiert werden. Dennoch gibt das Modell der partiellen Materialverteilung zum einen Aufschluss über die lokale Schichtdicke auf den Spitzen und in den Tälern der Substratopographie und zum anderen kann der Stand des Glättungsverlaufs Sa_n durch dieses Modell bestimmt werden, da eine gleichmäßige Schichtdicke auf den Spitzen und in den Tälern auf das Ende des Glättungsverlaufs hinweist.

5.2.4 Quintessenz

Das Modell der partiellen Materialverteilung gibt zum einen Aufschluss über die lokale Schichtdicke auf den Spitzen und in den Tälern der Substratopographie und zum anderen kann der Stand des Glättungsverlaufs Sa_n bestimmt werden, da eine gleichmäßige Schichtdicke auf den Spitzen und in den Tälern auf das Ende des Glättungsverlaufs Sa_n hinweist. Eine objektive Beurteilung des Glättungsverlaufs Sa_n wäre mit diesem Modell vorstellbar. Dieses setzt voraus, dass die Topographie nach jedem Druckdurchgang n

vermessen wird. Als objektives Bewertungskriterium zur Qualitätssicherung ist es aus diesem Grund nicht geeignet. Für die wissenschaftliche Untersuchung ist dieses Modell jedoch ein sinnvolles Werkzeug zur unterstützenden Betrachtung des Glättungsverlaufs Sa_n durch die Verteilung des Tintenfilms auf der Topographie.

6 Ergebnisse zur Identifizierung der Einflussgrößen

Das Modell der Glättung (Gl. 5.6) sagt den Einfluss der Tinteneigenschaften und der Druckparameter auf den Glättungsverlauf Sa_n voraus. Die Tinteneigenschaften, die die Oberflächenspannung σ_T und die Viskosität η beinhalten, sind durch die verwendete Tinte festgelegt und nicht variabel. Die dominierende Wellenlänge λ_{dom} ist ein Resultat aus den Druckparametern, die ebenfalls nicht einstellbar ist. Die Nivellierungszeit t_N und die aufgetragene mittlere Schichtdicke h , die zu den Druckparametern zählen, können hingegen variiert werden und wirken sich voraussichtlich auf den Glättungsverlauf Sa_n aus.

Neben den variablen Einflussgrößen, wie der mittleren Schichtdicke h und der Nivellierungszeit t_N aus dem Modell der Glättung (Gl. 5.6), soll der Einfluss der Neigungswinkel β_{tilt} , vgl. Abb. 4-2, einzelner Strukturelemente der Substratopographie auf den Glättungsverlauf Sa_n in den folgenden Kapiteln analysiert werden. Zusätzlich soll die flächige Auftragsform der Tintenschicht mit der selektiven Auftragsform, dem Bedrucken der lokalen Minima (Täler), verglichen und in das Modell der Glättung eingeordnet werden.

6.1 Einfluss der Substratopographie auf den Glättungsverlauf

Die stochastisch verteilten Strukturelemente einer lasergesinterten, undefinierten Substratopographie erzeugen eine Rauheit, die wiederum aus dem Lasersinterprozess und dem verwendeten Pulver resultiert. Diese Strukturelemente besitzen variable Neigungswinkel β_{tilt} , die das Fließverhalten der Tinte auf der Substratopographie beeinflussen. Zusätzlich fließt die Tinte auf der lasergesinterten, undefinierten Substratopographie ungerichtet in alle Richtungen ab. Mit der undefinierten Substratopographie erschwert dieser dreidimensionale Einfluss die genaue Beurteilung des Glättungsverhaltens. Eine exakte Analyse des Fließverhaltens der Tinte auf der Substratopographie kann somit auf der lasergesinterten, undefinierten Substratopographie nicht erfolgen. Es wird auf definierte Substratopographien, die periodisch angeordnete Strukturelemente besitzen und ein gerichtetes Abfließen der Tinte ermöglichen, zurückgegriffen. Die in drei Dimensionen undefinierte Substratopographie wird in x-, y- und z-Richtung definiert. In x-Richtung dient eine Zahnstruktur der stark vereinfachten Darstellung eines lasergesinterten Profils. In y-Richtung wird auf eine derartige Struktur verzichtet. So wird gewährleistet, dass die Tinte gerichtet in zwei, anstatt ungerichtet in alle Richtungen abfließt.

Im Folgenden werden die undefinierte und die definierten Substratopographien analysiert und im Anschluss allgemein der Einfluss dieser Substratopographie auf den Glättungsverlauf Sa_n nach dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) untersucht.

6.1.1 Analyse der unterschiedlichen Substratopographien

Die mechanische Bearbeitung der lasergesinterten Bauteile durch das Fräsen verändert die Substratopographie von einer undefinierten zu einer definierten Struktur. Die periodisch

angeordneten Strukturelemente entsprechen einer Zahnstruktur mit einem vorgegebenen Öffnungswinkel α_{open} der einzelnen Zähne, der unterschiedliche Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken definiert. Der Einfluss dieser Neigungswinkel β_{tilt} wird an der undefinierten Substrattopographie Wsls und an den definierten Substrattopographien W100, W120 und W135 (vgl. Kap. 4.1.1) untersucht.

Die undefinierte Substrattopographie Wsls zeigt in der REM Aufnahme des Profilausschnitts der Topographieaufnahme stochastisch verteilte Strukturelemente, die sich halbkugelförmig auf dem Substrat befinden. Diese Substrattopographie zeigt in x- sowie in y-Richtung ein ähnliches Profil, Abb.6-1a. Die nähere Betrachtung zeigt, dass die halbkugelförmigen Strukturelemente aus den Pulverkörner bestehen, die für den Lasersinterprozess verwendet werden. Umliegende, nicht geschmolzene Körner sind an der Schmelze des lasergesinterten Volumenelements anhaften geblieben und teilweise durch die Probenpräparation herausgebrochen, Abb.6-1b. Die stochastisch verteilten Strukturelemente der undefinierten Substrattopographie sind nach dem Fräsvorgang nicht mehr vorhanden. Die Profilansicht der definierten Substrattopographie W100 besitzt eine Zahnstruktur, deren Öffnungswinkel α_{open} bei circa 100° liegt. Zudem besitzt die Substrattopographie W100 einen unruhigen Flankenverlauf der einzelnen Zähne, die an den Spitzen Materialablagerungen in Form von Span aus dem Fräsvorgang besitzen, Abb.6-1c. Die Profilansicht der definierten Substrattopographie W120 besitzt ebenfalls eine Zahnstruktur, deren Öffnungswinkel α_{open} bei circa 120° liegt. Der Flankenverlauf der einzelnen Zähne wirkt durch den größeren Öffnungswinkel α_{open} ruhiger. Dennoch ist an den Spitzen Materialablagerungen in Form von Span aus dem Fräsvorgang vorhanden. Diese ist jedoch wesentlich weniger ausgeprägt, Abb.6-1d. Die definierte Substrattopographie W135 besitzt eine Zahnstruktur mit dem Öffnungswinkel α_{open} von circa 135° der einzelnen Zähne. Der Flankenverlauf der einzelnen Zähne wirkt durch den großen Öffnungswinkel α_{open} ruhig. Auf den Spitzen sind keine Materialablagerungen in Form von Span aus dem Fräsvorgang vorhanden, Abb.6-1e.

Der ruhige bzw. unruhige Flankenverlauf ist vermutlich ein Resultat aus dem schichtweisen Aufbau der Platten aus dem Lasersinterprozess und der anschließenden Nachbearbeitung der Substrattopographie bei definiertem Öffnungswinkel α_{open} durch den Fräsvorgang, der die Schnittstellen der einzelnen Volumenelemente tangiert. Die Fertigung der Platten erfolgte 90° zur Baufortschrittsrichtung. Aufgrund des Lasersinterprozesses findet eine inhomogene Verschmelzung der Zwischenschichten zweier aufeinanderfolgender Volumenelemente in z-Richtung (Baufortschrittsrichtung) statt. Die aufgerakelte Pulverschichtdicke h_s aus dem SLS-Prozess verteilt die Wärme unterschiedlich stark innerhalb des einzelnen Volumenelements. An der Schnittstelle zum darunterliegenden Volumenelement wird das Material weniger aufgeschmolzen. Dies wirkt sich auf die Zwischenschichthaftung der beiden Volumenelemente aus. Die Zahnstruktur wird senkrecht zur Baufortschrittsrichtung gefertigt. Besitzt die

Zahnstruktur einen geringen Öffnungswinkel α_{open} , tangiert die Zahnflanke eines Zahnes der Zahnstruktur die Schnittstelle zweier Volumenelemente stärker als ein Substrat, dessen Zahnstruktur einen größeren Öffnungswinkel α_{open} besitzt, vgl. Abb. 4-2 des Kapitels 4.1.1. Je stärker die Zahnflanke diese Schnittstelle tangiert, desto wahrscheinlicher brechen einzelne Segmente durch die mechanische Einwirkung des Fräsvorgangs heraus und der Flankenverlauf wird unruhiger. Zusätzlich haften lose Pulverkörner an der Oberfläche der aufgeschmolzenen Schmelze an. Diese Pulverkörner können bei mechanischer Einwirkung, wie es während des Fräsvorgangs vorkommt, ebenfalls herausbrechen und die Flanken ausfransen lassen. Die Materialanhäufung in Form von Span an den Spitzen der einzelnen Zähne ist vermutlich ein Resultat der Materialdicke an den Spitzen und dem Wärmeeintrag durch den Fräsvorgang. Während dem Fräsvorgang entsteht Wärme, die den Kunststoff erweicht. Besitzen die Spitzen der definierten Substrattopographien eine geringe Materialdicke, kann der aufgewärmte dünne Steg die Spitze nicht mehr stabilisieren und sie deformieren. Dadurch kommt es zu Hinterschneidungen im Profil der Substrattopographie. Mit zunehmendem Öffnungswinkel α_{open} vergrößert sich die Materialdicke an den Spitzen und der Wärmeeintrag wirkt sich weniger stark auf die Spitzen der Zahnstruktur aus. Die Hinterschneidungen werden so vermieden.

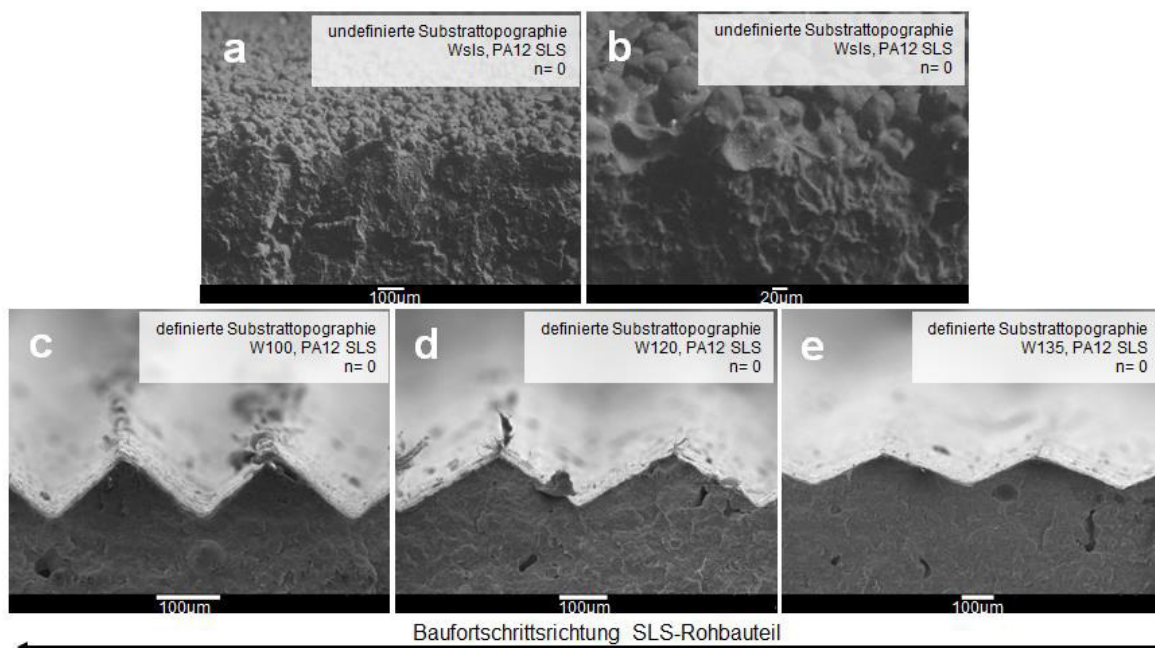


Abbildung 6-1: REM Aufnahmen der unbedruckten Substrattopographie a) Wsls, b) Wsls detailliert, c) W100, d) W120 und e) W135 zur Visualisierung der Strukturelemente.

Anhand der Profilausschnitte aus der Topographiemessung wird ersichtlich, dass die Strukturelemente der undefinierten, wie auch der definierten Substrattopographie in der gleichen Größenordnung liegen. Die Strukturelemente der undefinierten Substrattopographie Wsls besitzen keinen definierten Öffnungswinkel α_{open} . Aus dem Öffnungswinkel resultiert der Neigungswinkel β_{tilt} , der in einem Bereich von 0° bei einer Messstrecke von 1 mm und 90° bei

einer Messstrecke von 1.2 mm variiert, Abb. 6-2a. Die gerichtete Zahnstruktur der definierten Substrattopographie W135, besitzt den größten Öffnungswinkel α_{open} von 142° der einzelnen Zähne. Aus dem großen Öffnungswinkel α_{open} resultiert ein geringer Neigungswinkel β_{tilt} von 19° der Zahnflanken. Daraus folgt, dass die Anzahl n_V der Zähne auf eine Messstrecke l_r von 3 mm bei der definierten Substrattopographie W135 bei circa 5,5 liegt, Abb. 6-2b. Die gerichtete Zahnstruktur der definierten Substrattopographie W120 besitzt einen mittleren Öffnungswinkel α_{open} von 121° der einzelnen Zähne. Aus dem mittleren Öffnungswinkel α_{open} resultiert ein mittlerer Neigungswinkel β_{tilt} von 30° der Zahnflanken. Daraus folgt, dass die Anzahl n_V der Zähne auf eine Messstrecke l_r von 3 mm bei der definierten Substrattopographie W120 bei circa 7 liegt, Abb. 6-2c. Die gerichtete Zahnstruktur der definierten Substrattopographie W100 besitzt den kleinsten Öffnungswinkel α_{open} von 102° der einzelnen Zähne. Aus dem kleinen Öffnungswinkel α_{open} resultiert ein großer Neigungswinkel β_{tilt} von 39° der Zahnflanken. Daraus folgt, dass die Anzahl n_V der Zähne auf eine Messstrecke l_r von 3 mm bei der definierten Substrattopographie W120 bei circa 11 liegt, Abb. 6-2d.

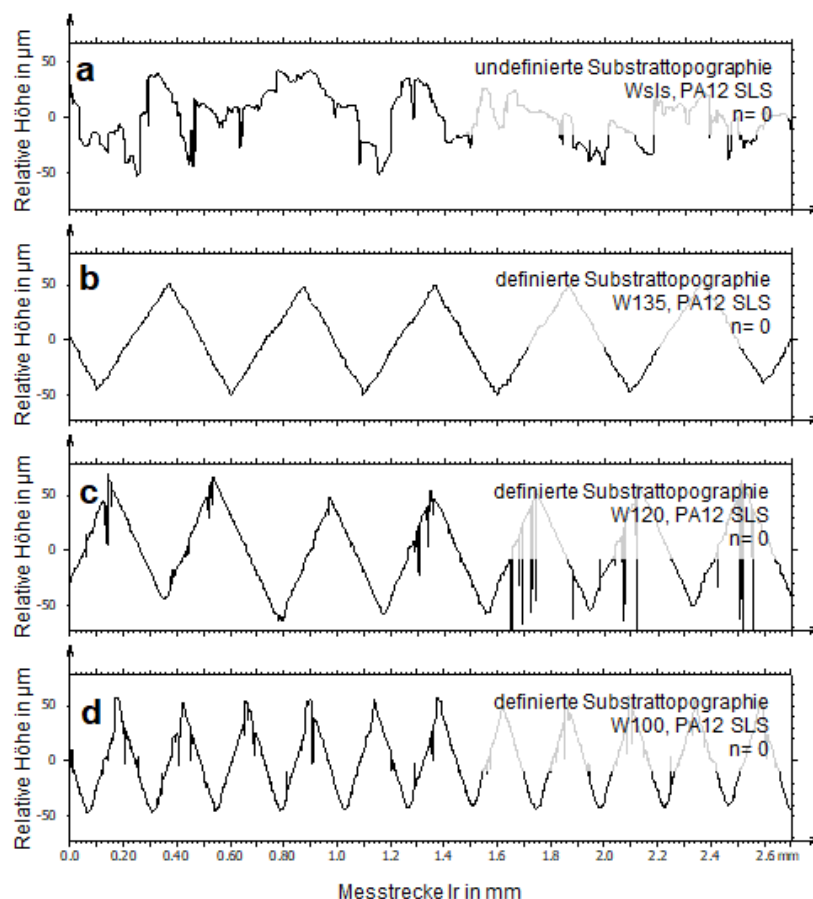


Abbildung 6-2: Verlauf der relativen Höhe des Profils in Abhängigkeit der Messstrecke l_r einer a) undefinierten Substrattopographie WsIs mit stochastisch verteilten Strukturelementen, einer b) definierter Substrattopographie W135 mit definierter Zahnstruktur, einer c) definierter Substrattopographie W120 mit definierter Zahnstruktur und einer d) definierter Substrattopographie W100 mit definierter Zahnstruktur.

Anhand der Anzahl n_V der Zähne, der Breite a eines Zahnes und der Rauheit R_z des Profils kann der Öffnungswinkel α_{open} (Gl. 4.1) der Zähne, der Neigungswinkel β_{tilt} (Gl. 4.2) der Zahnflanken und das freie Volumen $V_{frei,MF}$ (Gl. 4.3) der Messfläche berechnet werden.

Die Rauheit R_z der definierten Substrattopographien liegt im Bereich von 90 bis 104 μm , Tab. 6-1. Die Breite a des Zahnes der Substrattopographie W100 liegt im Mittel bei 112,0 μm . Aus der Rauheit R_z und der Breite a des Zahnes berechnet sich mit der Gleichung 4.1 ein Öffnungswinkel α_{open} der Substrattopographie W100 von 102°. Nach Gleichung 4.2 liegt ein Neigungswinkel β_{tilt} von 39° vor. Die Messfläche von 3 x 3 mm² umfasst bei dieser Substrattopographie eine Zahnanzahl n_V von 11. Daraus ergibt sich ein freies Volumen $V_{frei,MF}$ der Messfläche von 0,41 mm³ je 3 x 3 mm² Messfläche. Die Breite a eines Zahnes der Substrattopographie W120 nimmt einen Wert von 182 μm an. Aus dem daraus berechneten Öffnungswinkel α_{open} von 121° resultiert ein Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanke von 30°. In Summe befinden sich 7 Zähne auf der Substrattopographie bei einer Messfläche von 3 x 3 mm², woraus sich ein freies Volumen $V_{frei,MF}$ der Messfläche von 0,47 mm³. Die Substrattopographie W135 besitzt eine Rauheit R_z von 94 μm und eine Breite a des Zahnes von 270 μm . Daraus resultiert rechnerisch ein Öffnungswinkel α_{open} von 142° mit einem Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken von 19°. Der große Öffnungswinkel α_{open} mit der definierten Rauheit reduziert die Anzahl der Zähne n_V auf 5,5. Auf eine Messfläche von 3 x 3 mm² kommt ein freies Volumen $V_{frei,MF}$ von 0,42 mm³, Tab. 6-1. Die Berechnung des freien Volumens der undefinierten Substrattopographie ist aufgrund der komplexen Substrattopographie nicht möglich.

Tabelle 6-1: Experimentelle Rauheit R_z , Breite a eines Zahnes, Öffnungswinkel α_{open} , halber Öffnungswinkel $\alpha_{open}/2$ mit den resultierenden Neigungswinkel β_{tilt} und dem resultierenden freiem Volumen der Messfläche von 3 x 3 mm² der undefinierten und definierten Substrattopographien Wsls, W100, W120, W135.

Substrat-topographie	Rauheit R_z in μm	Breite a in μm	Öffnungswinkel α_{open} in °	Öffnungswinkel $\alpha_{open}/2$ in °	Neigungswinkel β_{tilt} in °	Freies Volumen $V_{frei,MF}$ in mm ³ auf 3 x 3 mm ²
Wsls	92,9 ± 6,5	undefiniert	undefiniert	undefiniert	undefiniert	undefiniert
W100	90,8 ± 0,8	112,0 ± 1,6	102	51	39	0,41
W120	104,3 ± 0,9	182,7 ± 1,9	121	60	30	0,47
W135	94,1 ± 1,1	270,3 ± 3,3	142	71	19	0,42

Die unterschiedlichen Öffnungswinkel α_{open} der definierten Substrattopographien ermöglichen die Analyse des Fließverhaltens der Tinte bei unterschiedlichen Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken. Dieses wird einen zusätzlichen Einfluss auf den Glättungsverlauf Sa_n haben. Der unruhige Flankenverlauf, wie auch die Form der Spitzen, werden den Glättungsverlauf Sa_n nicht signifikant beeinflussen. Lediglich der erste Druckdurchgang kann von den folgenden mit

einer höheren Rauheit abweichen, da dieser die unstetigen Stellen der Substrattopographie zunächst versiegelt. Für eine bessere Vergleichbarkeit wird der Glättungsfortschritt in den weiterführenden Analysen auf die Ausgangsrauheit Sa_0 normiert.

6.1.2 Glättungsverlauf auf unterschiedlichen Substrattopographien

Der experimentelle Glättungsverlauf Sa_n der undefinierten und der definierten Substrattopographien unterscheidet sich aufgrund der stochastisch verteilten bzw. der periodisch angeordneten Strukturelemente der Substrattopographien. Die Strukturelemente der Substrattopographie beeinflussen das Fließverhalten der Tinte, die den Glättungsverlauf Sa_n mit zunehmenden Druckdurchgang n verändert. Den Einfluss der Öffnungswinkel α_{open} , sowie des Neigungswinkeln β_{tilt} der Zahnflanken einzelner Strukturelemente auf der definierten Substrattopographie wird im Folgenden näher betrachtet, sodass das Verständnis des Einflusses dieser Strukturelemente auf das Fließverhalten der Tinte vorgenommen werden kann. Die undefinierte Substrattopographie wird ebenfalls analysiert um das Modell der Glättung (Gl. 5.6) unter realen Bedingungen zu überprüfen.

6.1.2.1 Einfluss der definierten Substrattopographie

Ein hoher Neigungswinkel β_{tilt} der Zähne beschleunigt den Glättungsverlauf Sa_n , da die Tinte bei einem größeren Neigungswinkel β_{tilt} schneller in die Fließbewegung startet und beschleunigt wird. Ein größerer Neigungswinkel β_{tilt} resultiert aus einem kleineren Öffnungswinkel α_{open} der Zähne aus der die definierte Substrattopographie besteht. Der Einfluss des Neigungswinkels β_{tilt} auf das Fließverhalten und damit auf den Glättungsverlauf Sa_n wird untersucht, indem die definierten Substrattopographien W100, W120 und W135 mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm pro Druckdurchgang n flächig bedruckt werden. Die Vernetzung der aufgedruckten Schicht folgt nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden.

Nach dem ersten Druckdurchgang ist die feingliedrige Zahnstruktur der definierten Substrattopographie W100 klar erkennbar. Aufgrund der geringen Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden sind vereinzelt Druckpunkte auf der Zahnstruktur zu finden. Diese machen sich durch einen ungleichmäßigen Verlauf der linienartigen Täler und Spitzen bemerkbar, Abb. 6-3a. Ein ähnliches Bild ist bei der Substrattopographie W120 zu finden. Die Zahnstruktur ist weniger feingliedrig, die einzelnen Zähne dennoch klar erkennbar. Vereinzelt sind Druckpunkte auf der Zahnstruktur erkennbar, Abb. 6-3b. Die Zahnstruktur mit der geringsten Anzahl an Zähnen innerhalb der Messfläche MF bildet die Substrattopographie W135. Nach dem ersten Druckdurchgang sind dort ebenfalls vereinzelt Druckpunkte auf der Zahnstruktur erkennbar, Abb. 6-3c. Im Gegensatz zu den unbedruckten Substrattopographien wurden die ehemals klar definierten Spitzen von den einzelnen Druckpunkten abgerundet, Abb. 6-3 a,b,c. Nach dem fünften Druckdurchgang ist die zuvor feingliedrige Zahnstruktur der definierten Substrattopographie W100 nicht mehr eindeutig identifizierbar. Die linienartigen Täler und

Spitzen sind stochastisch verteilten Druckpunkten gewichen, Abb. 6-3d. Die Substrattopographie W120 hingegen zeigt nach dem fünften Druckdurchgang weiterhin die linienartigen Täler und Spitzen. Jedoch nimmt die Ungleichmäßigkeit der linienartigen Struktur der Täler und Spitzen zu. Zudem schließen sich die Täler und die Spitzen der Substrattopographie allmählich zusammen, Abb. 6-3e. Die Substrattopographie W135 lässt nach dem fünften Druckdurchgang weiterhin die Zahnstruktur klar erkennen. Durch den zunehmenden Druckdurchgang ist die linienartige Struktur der Täler und Spitzen ungleichmäßiger geworden. Dieses ist auf die einzelnen Druckpunkte zurückzuführen, die die Substrattopographie zunehmend auffüllt, Abb. 6-3f. Der zehnte Druckdurchgang zeigt keine Veränderung der aufgefüllten Substrattopographie W100. Die stochastisch verteilten Druckpunkte sind weiterhin erkennbar, Abb. 6-3g. Die weniger feingliedrige Zahnstruktur der Substrattopographie W120 ist nach dem zehnten Druckdurchgang nahezu vollständig aufgefüllt. Die einzelnen Zähne der Zahnstruktur sind nur noch schwer erkennbar. Hingegen nimmt die ungleichmäßige Verteilung der Druckpunkte auf der Substrattopographie zu, Abb. 6-3h. Während nach dem zehnten Druckdurchgang die Substrattopographie W100 und W120 aufgefüllt wurde, ist die Zahnstruktur der Substrattopographie W135 weiterhin erkennbar. Die linienartige Struktur der Täler und der Spitzen sind zunehmend ungleichmäßiger, wodurch die Breite der Spitzen und auch der Täler zunimmt, Abb. 6-3i.

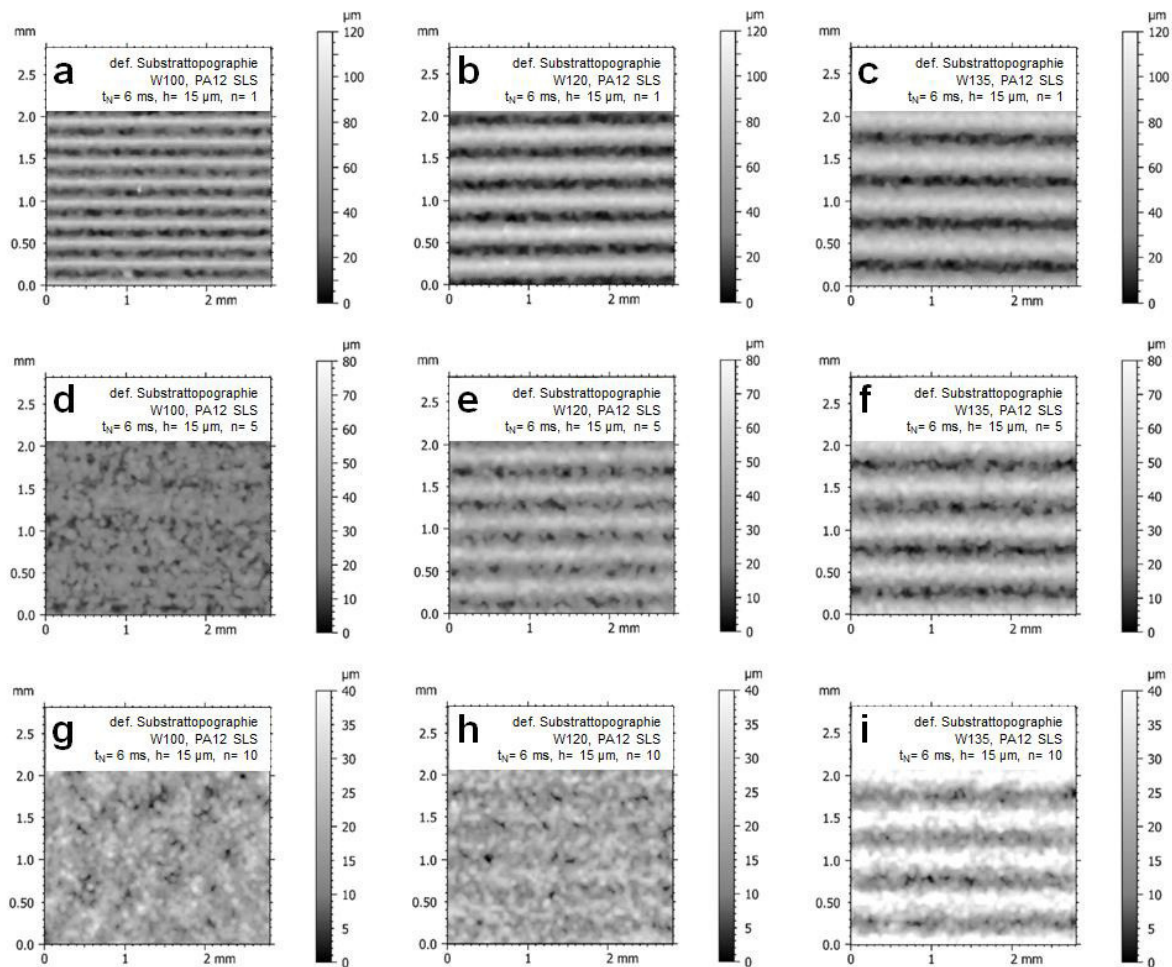


Abbildung 6-3: Topographieaufnahmen aus der Konfokalmikroskopie nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm der definierten Substratopographien a) W100 nach Druckdurchgang 1, b) W120 nach Druckdurchgang 1, c) W135 nach Druckdurchgang 1, d) W100 nach Druckdurchgang 5, e) W120 nach Druckdurchgang 5, f) W135 nach Druckdurchgang 5, g) W100 nach Druckdurchgang 10, h) W120 nach Druckdurchgang 10 und i) W135 nach Druckdurchgang 10.

Das der Glättungsverlauf Sa_n tatsächlich mit dem Neigungswinkels β_{tilt} der definierten Substratopographie zusammenhängt und der Zeitpunkt der vollständigen Füllung der definierten Substratopographie nicht aufgrund der unterschiedlichen freien Volumina der Zahnstrukturen verfälscht wird, soll durch die Berechnung des freien Volumens $V_{\text{frei, MF}}$ nach Gleichung 4.3 untersucht werden. Die mittlere Schichtdicke h von 15 μm ergibt auf einer Messfläche von 3 x 3 mm^2 ein Tintenvolumen V_{Tinte} von 0,135 mm^3 . Dieses Volumen wird mit jedem Druckdurchgang n auf die definierten Substratopographie W100, W120 und W135 aufgedruckt.

Das freie Volumen $V_{\text{frei, MF}}$ der Substratopographie W100 übersteigt mit 0,31 mm^3 das Tintenvolumen V_{Tinte} von 0,135 mm^3 auf einer Messfläche von 3 x 3 mm^2 . Das Tintenvolumen V_{Tinte} reicht im ersten Druckdurchgang nicht aus, um das freie Volumen $V_{\text{frei, MF}}$ der Substratopographie aufzufüllen, wodurch die Substratopographie erkennbar bleibt. Nach

dem fünften Druckdurchgang ist die definierte Substrattopographie W100 einer undefinierten Topographie gewichen. Das fünffach aufgedruckte Tintenvolumen V_{Tinte} liegt nach fünf Druckdurchgänge bei $0,675 \text{ mm}^3$ auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Das Tintenvolumen V_{Tinte} übersteigt das anfangs freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substrattopographie, wodurch eine vollständige Füllung nach diesem Druckdurchgang angenommen wird. Im Gegensatz zur Substrattopographie W100 dominieren die definierten Zahnstrukturen der Substrattopographien W120 und W135 nach dem fünften Druckdurchgang noch. Das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substrattopographie W120 liegt bei $0,36 \text{ mm}^3$ auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Nach dem fünften Druckdurchgang ist das aufgebrachte Tintenvolumen V_{Tinte} mit $0,675 \text{ mm}^3$ auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ wesentlich größer als das anfangs freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substrattopographie W120. Das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substrattopographie W135 liegt ebenfalls bei $0,38 \text{ mm}^3$ auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Nach dem fünften Druckdurchgang ist das aufgebrachte Tintenvolumen V_{Tinte} mit $0,675 \text{ mm}^3$ auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ ebenfalls wesentlich größer als das anfangs freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substrattopographie W135. Da die Zahnstrukturen beider Substrattopographien dennoch erkennbar sind, wird ein Zusammenhang des Neigungswinkels β_{tilt} der Zähne angenommen. Nach dem zehnten Druckdurchgang wurde ein Tintenvolumen V_{Tinte} von $1,35 \text{ mm}^3$ auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ aufgebracht. Dieses Tintenvolumen reicht aus, die Substrattopographie W120 nach zehn Druckdurchgängen einzuebnen. Obwohl das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substrattopographie W135 nahezu identisch zum freien Volumen $V_{frei,MF}$ der Substrattopographie W120 ist, wird nach dem zehnten Druckdurchgang keine vollständige Füllung der Substrattopographie erreicht. Wird der Neigungswinkel β_{tilt} der Zähne aus Tabelle 6.1 herangezogen, zeigt sich, dass die Substrattopographie W135 einen Neigungswinkel β_{tilt} der Zähne von 19° besitzt. Demgegenüber steht ein Neigungswinkel β_{tilt} der Zähne von 30° bei der Substrattopographie W120.

Die Versuchsreihe zeigt, dass durch einen geringen Neigungswinkel β_{tilt} eine geringe Hangabtriebskraft mit dazu entgegenwirkender Haftreibung auf die Tinte wirkt. Durch die geringe Hangabtriebskraft und die dazu entgegenwirkende Haftreibung fließt die Tinte innerhalb der Nivellierungszeit, im Vergleich zu einer höheren Hangabtriebskraft bei einem größeren Neigungswinkel β_{tilt} , langsamer von der Spitze entlang der Zahnflanke in Richtung des Tales. Die homogene Verteilung des Tintenfilms verändert sich zugunsten des Tales. Dies reduziert den Abstand zwischen dem Tal und der Spitze, wodurch sich das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substrattopographie, das zur Glättung gefüllt werden muss, reduziert. Die Hangabtriebskraft und die dazu entgegenwirkende Haftreibung eines Strukturelements mit geringem Neigungswinkel β_{tilt} verhindert jedoch, dass die Fließlänge der Tinte weit in die Täler reicht. Dies hat zur Folge, dass die Zahnstruktur der Substrattopographie W135 auch nach

dem zehnten Druckdurchgang noch klar erkennbar, hingegen die Zahnstruktur der Substrattopographie W100 bereits nach dem fünften Druckdurchgang verschwunden ist.

Das Fließverhalten der Tinte auf den definierten Substrattopographien mit unterschiedlichen Neigungswinkeln β_{tilt} spiegelt sich in der Abnahme des Verhältnisses der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 pro Druckdurchgang n wider.

Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei den definierten Substrattopographien W100, W120 und W135 mit zunehmenden Druckdurchgang n nahezu exponentiell ab. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit fortschreitendem Druckdurchgang n abflacht. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der definierten Substrattopographie W100 nimmt innerhalb der ersten vier Druckdurchgänge nahezu gleichmäßig ab. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n , der die Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit Sa von zwei aufeinanderfolgenden Druckdurchgängen beschreibt, liegt in diesem Bereich bei circa 20 %. Ab dem vierten Druckdurchgang stagniert die Glättung bei einem Verhältnis von circa 0,15 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Es findet kein weiterer Glättungsfortschritt ΔSa_n statt. Hier stellt sich die, mit den Druckeinstellungen minimal erreichbare, arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie ein, Abb. 6-4. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der definierten Substrattopographie W120 nimmt bis zum sechsten Druckdurchgang nahezu linear ab. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n liegt in diesem Bereich bei circa 10 %. Dieser Glättungsfortschritt ΔSa_n flacht sich ab dem siebten Druckdurchgang ab, bis sich ab dem zehnten Druckdurchgang das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nicht mehr signifikant verändert. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie wird erreicht, Abb. 6-4. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der definierten Substrattopographie W135 nimmt über die 15 Druckdurchgänge exponentiell ab. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n ist bei dieser Substrattopographie am geringsten ausgeprägt und reduziert sich mit zunehmenden Druckdurchgang n zunehmend. Nach 15 Druckdurchgängen stellt sich, die mit den Druckeinstellungen minimal erreichbare, arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie noch nicht ein, Abb. 6-4.

Die definierte Substrattopographie W100 besitzt einen Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken von 39°. Dieser große Neigungswinkel β_{tilt} lässt bei gleichbleibender Nivellierungszeit t_N die Tinte beschleunigt in die Täler fließen, wodurch der Glättungsfortschritt ΔSa_n zunimmt. Wird der Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken geringer, reduziert sich die Fließgeschwindigkeit der Tinte und der Glättungsfortschritt ΔSa_n nimmt ab. Dieses bestätigt sich mit der definierten Substrattopographie W120, die einen Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken von 30° besitzt. Wird der Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken weiter verringert, reduziert sich die Fließgeschwindigkeit der Tinte weiterhin und der Glättungsfortschritt ΔSa_n nimmt weiter ab,

wie sich bei der definierten Substratopographie W135, die einen Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken von 19° besitzt, zeigt.

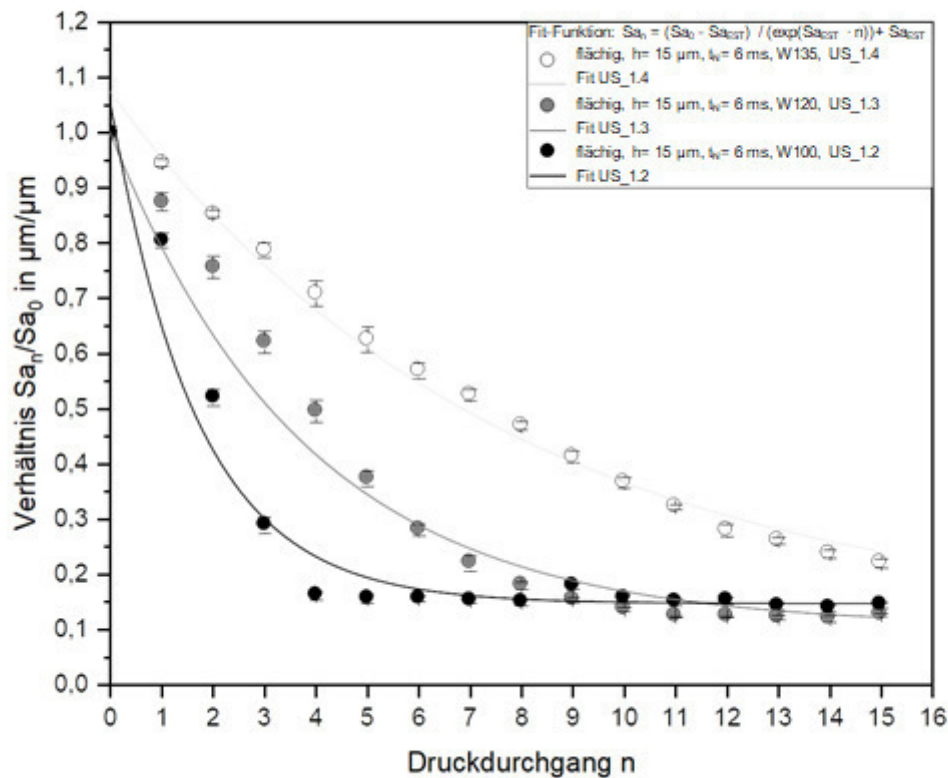


Abbildung 6-4: Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zu Sa_0 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden unter den Einfluss unterschiedlicher Substratopographien und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6).

Der Glättungsverlauf Sa_n bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einem mittleren Schichtauftrag h von $15 \mu\text{m}$ lässt eine unterschiedliche Materialverteilung der Tinte auf der Substratopographie vermuten. Diese Vermutung wird mit REM Aufnahmen analysiert.

Nach dem ersten Druckdurchgang sammelt sich auf der Substratopographie W100, die einen Neigungswinkel β_{tilt} von 39° besitzt, in den Tälern Tinte an. Auf den Spitzen ist hingegen nur wenig Material vorhanden. Auf den Zahnflanken, zwischen den beiden Extrempunkten, liegt eine dünne Schicht, die in einem Meniskus mündet, Abb. 6-5a. Die Verringerung des Neigungswinkels β_{tilt} auf 30° , der bei der Substratopographie W120 zu finden ist, zeigt, dass sich weiterhin der Großteil der Tinte in den Tälern sammelt und sich auf den Spitzen nahezu kein Material befindet. Die dünne Schicht zwischen den Spitzen und den Tälern, die in einem Meniskus mündet, ist ebenfalls erkennbar. Der Meniskus ist, im Vergleich zu einer Substratopographie mit größerem Neigungswinkel β_{tilt} von 39° , schwächer ausgeprägt, Abb. 6-5b. Insgesamt ist die Tinte, bei einem geringeren Neigungswinkel β_{tilt} , gleichmäßiger auf der

Substrattopographie verteilt. Dies bestätigt der Querschnitt der Substrattopographie W135, die einen Neigungswinkel β_{tilt} von 19° besitzt. Der Meniskus ist geringfügig ausgebildet, da sich aufgrund des langsamen Fließens nur wenig Tinte in den Tälern gesammelt hat. Trotz des geringen Öffnungswinkels α_{open} des Zahnes von 142° befindet sich kaum Tinte auf den Spitzen, Abb. 6-5c. Mit einer größeren Anzahl an Schichten durch mehrere Druckdurchgänge, wird die unterschiedliche lokale Materialverteilung auf den Profilen stärker hervorgehoben. Nach fünf Druckdurchgängen sind theoretisch betrachtet circa 75 % der Täler gefüllt. Dies stimmt näherungsweise mit dem Füllstand der Substrattopographie W100, die einen Neigungswinkel β_{tilt} von 39° besitzt, überein. Die Tinte hat sich in den Tälern gesammelt und bildet dort einen Meniskus aus. Auf den Spitzen der Zahnstruktur ist weiterhin kaum Tinte verblieben. Zwischen den beiden Extremstellen zeigt sich, dass die Schichtdicke h an den Zahnflanken stetig anwächst und nicht homogen vorliegt, Abb. 6-5d. Mit zunehmendem Neigungswinkel β_{tilt} wird diese Verteilung schwerer zu erkennen. Dies zeigt sich nach dem fünften Druckdurchgang der Substrattopographie W120, die einen Neigungswinkel β_{tilt} von 29° besitzt. Auf den Spitzen ist Tinte zu finden, dessen Materialverteilung zwischen der Spitze und der Zahnflanken jedoch heterogen ist, Abb. 6-5e. Die Heterogenität des Films bei einem Neigungswinkel β_{tilt} von 19° der Substrattopographie W135, die nach dem ersten Druckdurchgang noch homogen wirkte, ist nach fünf Druckdurchgängen verstärkt, Abb. 6-5f. Nach dem zehnten Druckdurchgang ist die Substrattopographie W100 mit größerem Neigungswinkel β_{tilt} vollständig gefüllt. Die neue Topographie ist geprägt durch einzelne Druckpunkte, Abb. 6-5g. Der hohe Neigungswinkel β_{tilt} der Substrattopographie W100 hat nahezu das gesamte Material in die Täler geleitet und damit die Täler bestmöglich aufgefüllt. Dies hat zur Folge, dass sich die Substrattopographie nach der vollständigen Füllung nicht mehr abzeichnet. Die Verringerung des Neigungswinkels β_{tilt} auf 30° der Substrattopographie W120 zeigt, dass sich nach dem zehnten Druckdurchgang ebenfalls die Substrattopographie vollständig gefüllt hat. Im Gegensatz zum geringeren Neigungswinkel der Substrattopographie W100 besitzt die neue Topographie eine wellenförmige Struktur, die näherungsweise der ursprünglichen Substrattopographie entspricht, Abb. 6-5h. Diese wellenförmige Struktur wird bei einem Neigungswinkel β_{tilt} von 19° der Substrattopographie W135, stärker ausgeprägt, Abb. 6-5i. Die Überlagerung der Tintentopographie und der Substrattopographie wird ersichtlich.

Durch einen geringen Neigungswinkel β_{tilt} wirkt eine geringe Hangabtriebskraft auf die Tinte. Der zunächst gleichmäßig aufgedruckte Tintenfilm liegt homogen verteilt auf der Substrattopographie vor. Auf der Spitze der Zahnstruktur liegt ebenso viel Tinte wie in den Tälern und auf den Zahnflanken. Durch die geringe Hangabtriebskraft und die dazu entgegenwirkende Haftreibung fließt die Tinte innerhalb der Nivellierungszeit, im Vergleich zu einer höheren Hangabtriebskraft, langsamer von der Spitze entlang der Zahnflanke in

Richtung des Tales. Im Tal nimmt die Tinte den energetisch günstigsten Zustand ein, indem diese dort einen Meniskus ausbildet. Durch eine zu geringe Nivellierungszeit verändert sich zwar die homogene Verteilung des Tintenfilms zugunsten des Tales, die Tinte kann jedoch den energetisch günstigsten Zustand im Tal nicht einnehmen und wird bereits an den Zahnflanken vernetzt. Die Vernetzung der Tinte an den Zahnflanken hat zur Folge, dass der Neigungswinkel der neu eingestellten Topographie weiter sinkt. Wird der Neigungswinkel β_{tiff} weiter verringert, reduziert sich die Kraft, die die Tinte in Richtung Tal beschleunigt. Ist diese zu gering und die Haftreibung entsprechend groß, bewegt sich die Tinte innerhalb einer vorgegebenen Nivellierungszeit nahezu nicht und verharrt in ihrer Position. Die Substrattopographie wird mit jeder weiteren Schicht abgebildet und nicht weiter geglättet. Dies zeigt sich in dem Neigungswinkel β_{tiff} der Substrattopographie W135, Abb. 6-5i.

Die Tinte konnte durch den großen Neigungswinkel β_{tiff} der Flanken, in der vorgegebenen Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden, in den energetisch günstigsten Zustand fließen. Die Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden reicht somit aus, dass Tinte auf den Strukturelementen mit einem Öffnungswinkel α_{open} von 120° in die Täler fließt und dort vernetzt.

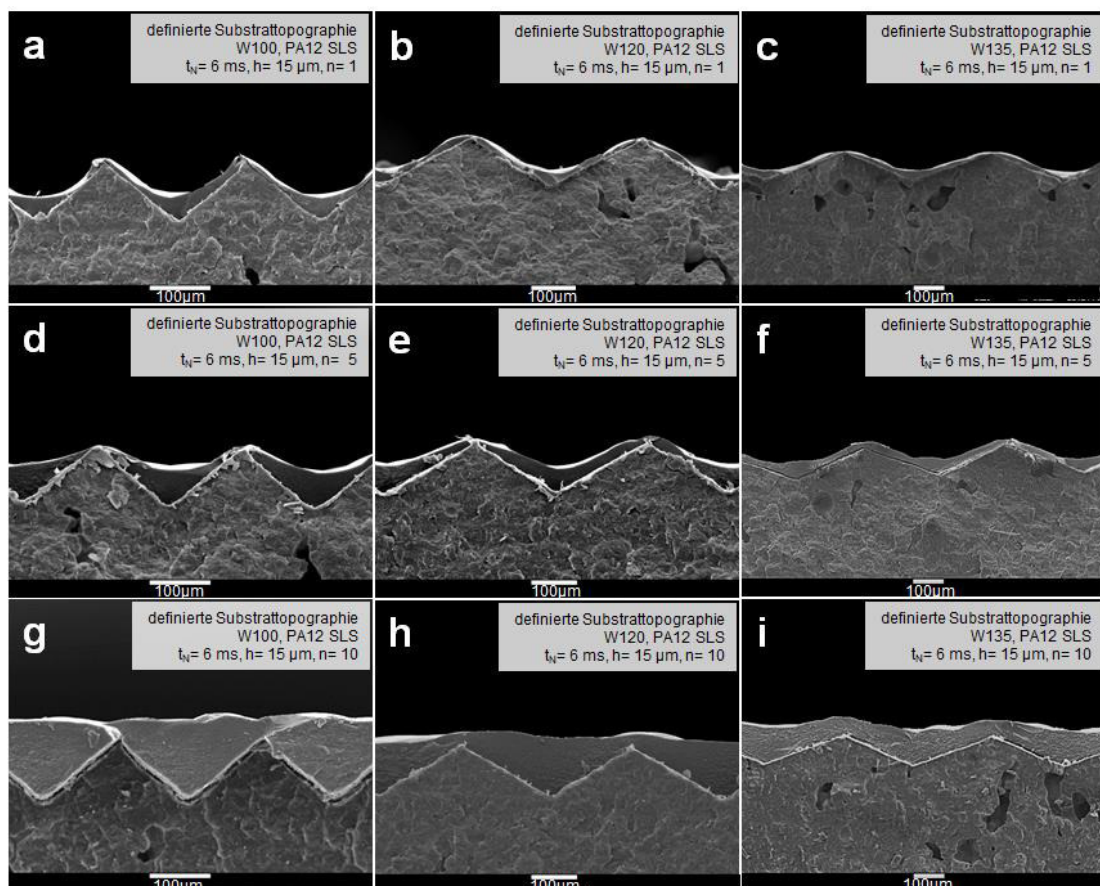


Abbildung 6-5: REM Aufnahmen nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 µm der definierten Substrattopographien a) W100 nach Druckdurchgang 1, b) W120 nach Druckdurchgang 1, c) W135 nach Druckdurchgang 1, d) W100 nach Druckdurchgang 5, e) W120 nach Druckdurchgang 5, f) W135 nach Druckdurchgang 5, g) W100 nach Druckdurchgang 10, h) W120 nach Druckdurchgang 10 und i) W135 nach Druckdurchgang 10.

Der Verlauf zeigt, dass mit zunehmendem Druckdurchgang n die zunächst ausgeprägten Spitzen allmählich abrunden und die Tiefe der Profile zunehmend abnimmt. Dies erfolgt so lange, bis die Zeit, die das Tintentropfchen zum Fließen hat nicht mehr ausreicht, um die Tinte bei einem bestimmten Neigungswinkel β_{tilt} eines Untergrundes noch zum Fließen zu bewegen. Dieses wird die resultierende Rauheit, die erreichbar wird, zusätzlich beeinflussen.

Die Verteilung der Tinte auf der Substrattopographie ist, wie in den REM Aufnahmen ersichtlich, heterogen. In den Tälern befindet sich mehr Tinte als auf den vorhandenen Spitzen. Mittels der REM Aufnahmen kann stichprobenartig die Schichtdicke ermittelt werden. Dies bezieht sich auf eine festgelegte Position auf der Substrattopographie, die die jeweilige REM Aufnahme zeigt. Anhand der Materialverteilung, kann die Schichtdicke h_{Tal} im Tal (Gl. 5.13) berechnet und Rückschlüsse auf das Fließverhalten der Tinte in Abhängigkeit des Neigungswinkels β_{tilt} getroffen werden.

Die homogene, mittlere Schichtdicke auf dem Substrat liegt bei 15 μm . Der Materialauftrag der Schichtdicke h_{Tal} liegt aufgrund des Fließverhaltens der Tinte im Tal zunächst über diesem Wert. Im ersten Druckdurchgang fließt bei der Substrattopographie W135 weniger Tinte in die Täler. Hier liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal bei circa 25 μm . Wird der Öffnungswinkel α_{open} verkleinert, vergrößert sich der Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken. Bei der Substrattopographie W120 liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal bei circa 27 μm . Steigt der Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken weiter, wie die Substrattopographie W100 zeigt, fließt nahezu die gesamte Tinte in die Täler. Die Schichtdicke h_{Tal} im Tal übersteigt die maximal mögliche Schichtdicke h_{Tal} im Tal von 30 μm und liegt bei 32 μm , Abb. 6-6. Der zweite Druckdurchgang bleibt in der Verteilung identisch zum ersten Druckdurchgang. Die Substrattopographie W135 besitzt mit 17 μm die geringste Schichtdicke h_{Tal} im Tal. Eine Schichtdicke h_{Tal} im Tal von 22 μm erzielt die Substrattopographie W120. Die größte Schichtdicke h_{Tal} befindet sich nach dem zweiten Druckdurchgang im Tal der Substrattopographie W100. Diese liegt bei 25 μm , Abb. 6-6. Während nach dem dritten Druckdurchgang die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie W100 weiterhin bei 25 μm liegt, liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie W120 und W135 nur unwesentlich mit 18 μm über dem minimal möglichen Schichtauftrag im Tal, Abb. 6-6. Ab dem vierten Druckdurchgang ändert sich die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie W135 mit zunehmendem Druckdurchgang n nur unwesentlich. Diese liegt geringfügig über der minimal möglichen Schichtdicke h_{Tal} von 15 μm im Tal, wodurch sich die Substrattopographie W135 an die geringste arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie innerhalb der 15 Druckdurchgänge annähert, diese jedoch noch nicht erreicht. Der Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanken bei der Substrattopographie W135 beschleunigt die Tinte langsamer als ein größerer Neigungswinkel β_{tilt} der Zahnflanke. Daraus resultieren ein größerer Schichtauftrag und mehr benötigte Druckdurchgänge n , bis eine gleichmäßige Schichtdicke h_{Tal} von 15 μm

im Tal erreicht wird, Abb. 6-6. Ab dem fünften Druckdurchgang liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substratopographie W100 bei circa $14 \mu\text{m}$. In den fortlaufenden Druckdurchgängen fluktuiert der Schichtdicke h_{Tal} im Tal um $15 \mu\text{m}$. Dies zeigt, dass eine homogene Materialverteilung auf der Substratopographie stattfindet und es deutet darauf hin, dass die maximale Glättung nach vier Druckdurchgängen erreicht wurde, Abb. 6-6. Die homogene Materialverteilung mit einer Schichtdicke h_{Tal} im Tal von $15 \mu\text{m}$ der Substratopographie W120 stellt sich ab dem elften Druckdurchgang ein. Ab diesem Druckdurchgang variiert die Schichtdicke h_{Tal} im Tal um diesen Wert, Abb. 6-6.

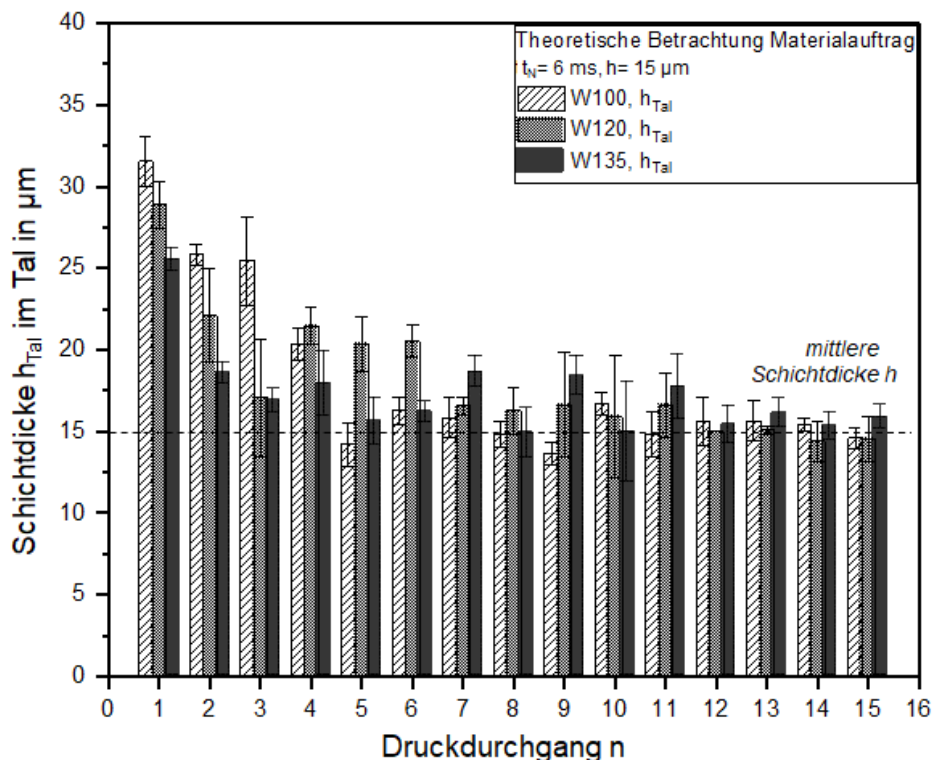


Abbildung 6-6: Theoretische Schichtdicke h_{Tal} im Tal (Gl. 5.13) der definierten Substratopographie W100, W120 und W135 in Abhängigkeit des Druckdurchgang n bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einem mittleren Schichtdicke h von $15 \mu\text{m}$.

Der Einfluss des Neigungswinkels β_{tilt} auf das Fließverhalten soll durch eine Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden minimiert werden, da angenommen wird, dass die Tinte ausreichend Zeit hat in die Täler zu gelangen. Durch diesen Schritt kann der Einfluss des freien Volumens $V_{frei,MF}$ der Substratopographien auf den Glättungsverlauf Sa_n untersucht werden, indem die definierten Substratopographien W100, W120 und W135 mit einer mittleren Schichtdicke h von $15 \mu\text{m}$ pro Druckdurchgang n flächig bedruckt werden. Die Vernetzung der aufgedruckten Schicht folgt nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden.

Nach dem ersten Druckdurchgang ist die feingliedrige Zahnstruktur der definierten Substrattopographie W100 klar erkennbar. Aufgrund der hohen Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden sind keine Druckpunkte auf der Zahnstruktur zu finden. Die linienartigen Spitzen mit ihrer schmalen Breite sind eindeutig identifizierbar, Abb. 6-7a. Ein ähnliches Bild ist bei der Substrattopographie W120 zu finden. Die Zahnstruktur ist weniger feingliedrig als die Substrattopographie W100, aber dennoch klar erkennbar. Aufgrund der hohen Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden sind keine Druckpunkte auf der Zahnstruktur zu finden. Die linienartigen Spitzen mit ihrer schmalen Breite sind ebenfalls eindeutig identifizierbar, Abb. 6-7b. Die Substrattopographie W135 besitzt die Zahnstruktur mit der geringsten Anzahl an Zähnen innerhalb der Messfläche MF . Nach dem ersten Druckdurchgang sind dort ebenfalls keine Druckpunkte auf der Zahnstruktur erkennbar. Die linienartigen Spitzen und Täler sind klar erkennbar, Abb. 6-7c. Identisch zu den unbedruckten Substrattopographien, wurden die ehemals klar definierten Spitzen direkt abgebildet, Abb. 6-7 a,b,c. Nach dem zweiten Druckdurchgang ist die zuvor feingliedrige Zahnstruktur der definierten Substrattopographie W100 weiterhin eindeutig identifizierbar. Die linienartigen Täler und Spitzen werden klar abgebildet, Abb. 6-7d. Die Substrattopographie W120 zeigt ebenfalls nach dem fünften Druckdurchgang weiterhin die linienartigen Täler und Spitzen. Jedoch nimmt die Breite der linienartigen Struktur der Täler, im Vergleich zur einfach bedruckten Substrattopographie, zu. Zudem schließen sich die Täler und die Spitzen der Substrattopographie allmählich zusammen, Abb. 6-7e. Die Substrattopographie W135 lässt nach dem zweiten Druckdurchgang weiterhin die Zahnstruktur klar erkennen. Durch den zunehmenden Druckdurchgang ist die linienartige Struktur der Täler und Spitzen weiterhin gleichmäßig, jedoch nimmt die Breite der Täler zu. Dieses ist auf die Lage der Tinte in den Tälern der Substrattopographie zurückzuführen, wodurch die Substrattopographie zunehmend aufgefüllt wird, Abb. 6-7f. Der fünfte Druckdurchgang zeigt, dass die Substrattopographie W100 vollständig gefüllt wurde. Die ehemaligen Spitzen der Zahnstruktur scheinen nur noch leicht durch die dünne Tintenschicht, Abb. 6-7g. Die weniger feingliedrige Zahnstruktur der Substrattopographie W120 ist nach dem fünften Druckdurchgang ebenfalls vollständig aufgefüllt. Die Umverteilung der Tinte hat jedoch Artefakte auf der Topographie ausgelöst, die sich durch Einfallstellen erkennbar machen Abb. 6-7h. Die Substrattopographie W135 ist ebenfalls nach dem fünften Druckdurchgang vollständig gefüllt. Die Zahnstruktur scheint nicht durch die dünne Tintenschicht und auf der Topographie haben sich durch die Umverteilung der Tinte ebenfalls Artefakte in Form von Einfallstelen gebildet, Abb. 6-7i.

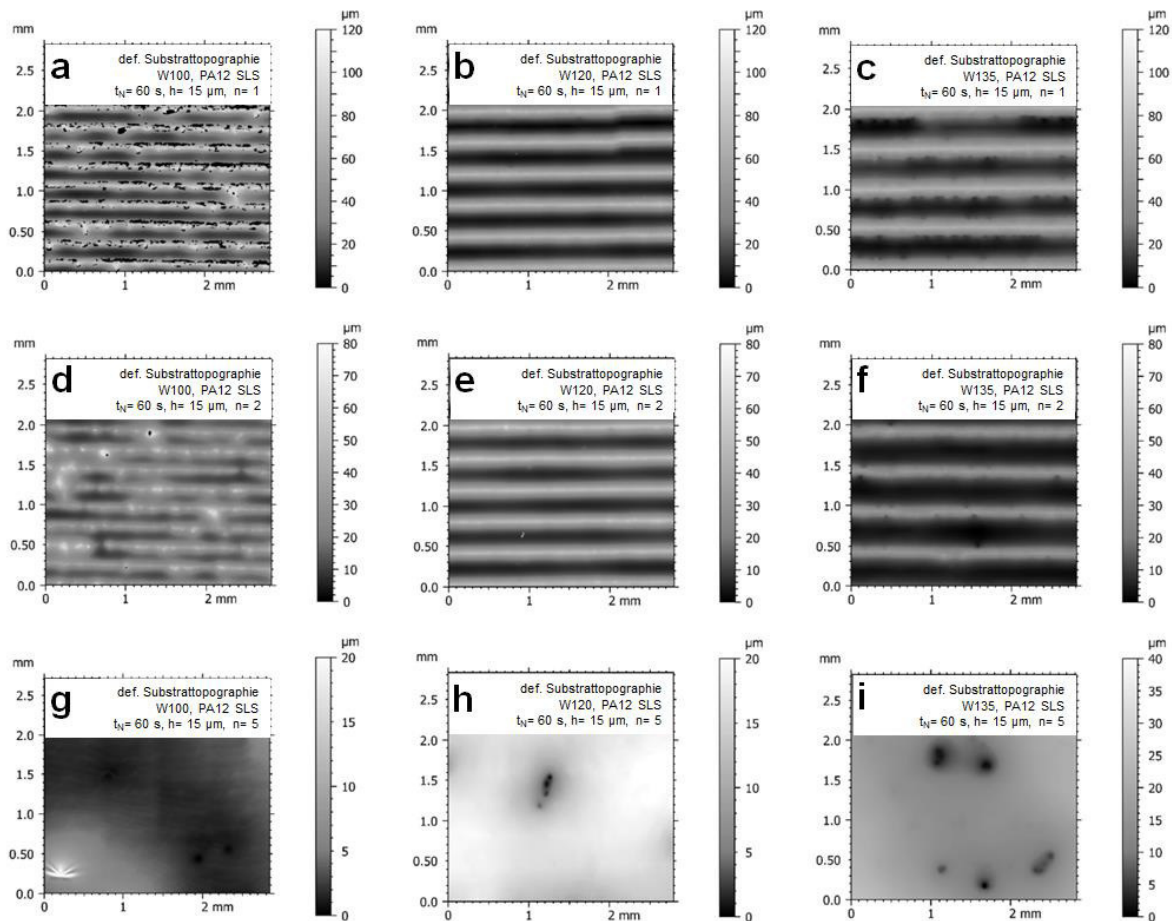


Abbildung 6-7: Topographieaufnahmen aus der Konfokalmikroskopie nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm der definierten Substratopographien a) W100 nach Druckdurchgang 1, b) W120 nach Druckdurchgang 1, c) W135 nach Druckdurchgang 1, d) W100 nach Druckdurchgang 2, e) W120 nach Druckdurchgang 2, f) W135 nach Druckdurchgang 2, g) W100 nach Druckdurchgang 5, h) W120 nach Druckdurchgang 5 und i) W135 nach Druckdurchgang 5.

Um ausschließen zu können, dass die Anzahl der Druckdurchgänge $n_{s,full}$ bis zur maximalen Füllung der Substratopographie aufgrund der unterschiedlichen freien Volumina der Zahnstrukturen verfälscht wird, soll durch die Berechnung des freien Volumens $V_{frei,MF}$ nach Gleichung 4.3 das vorherrschende freie Volumen untersucht werden. Die mittlere Schichtdicke h von 15 μm ergibt auf einer Messfläche von 3 x 3 mm^2 ein Tintenvolumen V_{Tinte} von 0,135 mm^3 . Dieses Volumen wird mit jedem Druckdurchgang n auf die definierten Substratopographie W100, W120 und W135 aufgedruckt. Das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substratopographie W100 übersteigt mit 0,41 mm^3 das Tintenvolumen V_{Tinte} von 0,135 mm^3 auf einer Messfläche von 3 x 3 mm^2 . Das Tintenvolumen V_{Tinte} reicht im ersten Druckdurchgang nicht aus, um das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substratopographie aufzufüllen, wodurch die Substratopographie erkennbar bleibt, Abb. 6-7a. Nach dem zweiten Druckdurchgang ist die definierte Substratopographie W100 weiterhin erkennbar, Abb. 6-7d. Das zweifach aufgedruckte Tintenvolumen V_{Tinte} liegt nach zwei Druckdurchgänge bei 0,27 mm^3 auf einer

Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Das Tintenvolumen V_{Tinte} unterliegt weiterhin dem anfänglichen freie Volumen $V_{frei, MF}$ der Substrattopographie, wodurch ein vollständige Füllung nach diesem Druckdurchgang ausgeschlossen wird und die Zahnstruktur der Substrattopographie erkennbar bleibt, Abb. 6-7d. Das freie Volumen $V_{frei, MF}$ der Substrattopographie W120 liegt bei $0,47 \text{ mm}^3$ auf eine Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Nach dem zweiten Druckdurchgang ist das aufgebrachte Tintenvolumen V_{Tinte} mit $0,27 \text{ mm}^3$ weiterhin geringer als das anfängliche freie Volumen $V_{frei, MF}$ der Substrattopographie W120 auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Dies hat zur Folge, dass die Zahnstruktur nach dem zweiten Druckdurchgange erkennbar bleibt, Abb. 6-7e. Das freie Volumen $V_{frei, MF}$ der Substrattopographie W135 liegt bei $0,42 \text{ mm}^3$ auf eine Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Nach dem zweiten Druckdurchgang ist das aufgebrachte Tintenvolumen V_{Tinte} mit $0,27 \text{ mm}^3$ ebenfalls geringer als das anfängliche freie Volumen $V_{frei, MF}$ der Substrattopographie W135 auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$. Die Substrattopographie ist hier ebenfalls ekenubar, Abb. 6-7f. Nach dem fünften Druckdurchgang wurde ein gesamtes Tintenvolumen V_{Tinte} von $0,675 \text{ mm}^3$ auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ aufgebracht. Dieses Tintenvolumen reicht aus, die Substrattopographie W100 vollständig zu füllen, Abb. 6-7g. Ebenso reicht dieses Tintenvolumen aus, die Substrattopographie W120 nach fünf Druckdurchgängen einzuebnen, Abb. 6-7h. Da das freie Volumen $V_{frei, MF}$ der Substrattopographie W135 nahezu identisch zum freie Volumen $V_{frei, MF}$ der Substrattopographie W120 ist, wird auch diese Substrattopographie nach fünf Druckdurchgängen vollständig aufgefüllt, Abb. 6-7i. Die freien Volumina $V_{frei, MF}$ der Substrattopographien W100, W120, W135 benötigen rein rechnerisch mindestens einen Druckdurchgang n von 3,04 (W100), 3,48 (W120) und 3,11 (W135), um vollständig mit Tinte gefüllt zu werden. Da die Tinte nicht anteilig aufgebracht werden kann, benötigen somit die drei Substrattopographien insgesamt jeweils vier Druckdurchgänge. Da mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden ausschließlich die Täler der Substrattopographien gefüllt werden, kann durch das vorherrschende freie Volumen $V_{frei, MF}$ der Substrattopographie die Mindestanzahl der Druckdurchgänge, die benötigt werden, um die Substrattopographie aufzufüllen, abgeschätzt werden. Daraus kann gefolgert werden, dass eine erhöhte Anzahl an Druckdurchgängen des Glättungsverlaufs Sa_n bis zur maximalen Glättung nicht auf das unterschiedliche freie Volumen zurückzuführen ist.

Die Mindestanzahl an Druckdurchgängen n , die zur vollständigen Füllung der freien Volumina der Substrattopographien mit unterschiedlichen Neigungswinkeln β_{tilt} benötigt werden, spiegelt sich in dem Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 pro Druckdurchgang n bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden wider.

Das Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei den definierten Substrattopographien W100, W120 und W135 mit zunehmenden Druckdurchgang n exponentiell ab, Abb. 6-8. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten

Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit fortschreitendem Druckdurchgang n abflacht. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der definierte Substratopographie W100 nimmt innerhalb des ersten Druckdurchgangs geringer ab. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n liegt in diesem Bereich bei circa 12 %. Das Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der Substratopographie W120 und W135 hingegen liegt bei $0,6 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Dies entspricht einem Glättungsfortschritt ΔSa_n von circa 40 %, Abb. 6-8. Der zweite Druckdurchgang nivelliert den geringeren Glättungsfortschritt ΔSa_n der Substratopographie W100 aus dem ersten Druckdurchgang. Dieser liegt bei circa 62 % und entspricht einem Verhältnis von $0,25 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Die Substratopographie W120 und W135 liegen ebenfalls nach dem zweiten Druckdurchgang bei einem Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 in einem Bereich von $0,4 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ bzw. $0,3 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Dies entspricht einem Glättungsfortschritt ΔSa_n der Substratopographie W120 von 25 % und einem Glättungsfortschritt ΔSa_n der Substratopographie W135 von 30 %, Abb. 6-8. Ab dem vierten Druckdurchgang stellt sich bei allen drei definierten Substratopographien die maximal erreichbare Glättung mit der geringsten arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} ein. Dies bestätigt die zuvor berechnete Mindestanzahl an Druckdurchgängen, die zur vollständigen Füllung der Substratopographien benötigt wird. Der Verlauf der drei Substratopographien ist nahezu identisch und spiegelt sich in den aufeinanderliegenden Fitfunktionen wider.

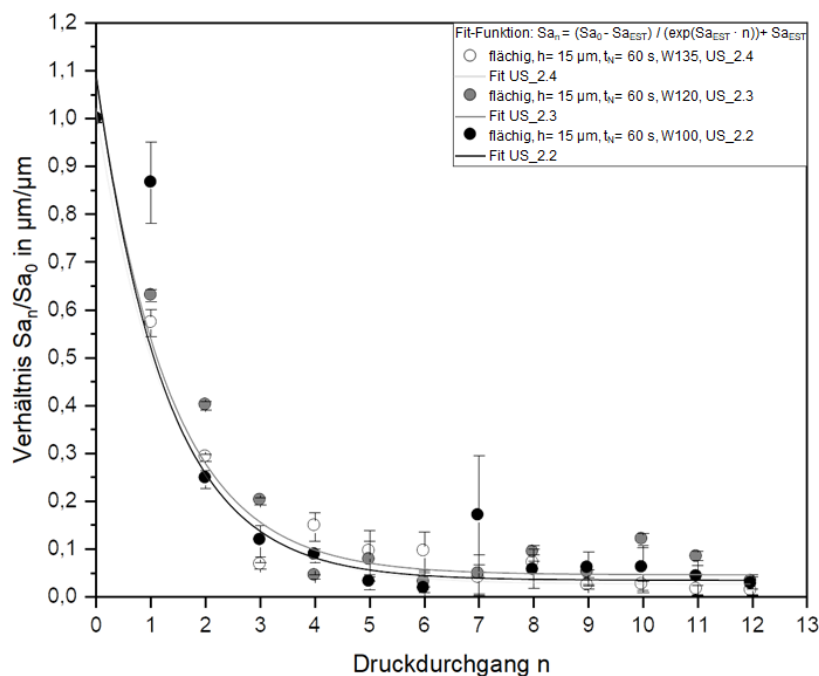


Abbildung 6-8: Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zu Sa_0 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden unter den Einfluss unterschiedlicher Substratopographien W100, W120 und W135 und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6).

Die Abweichung des Glättungsfortschritts der Substratopographie W100 nach dem ersten Druckdurchgang liegt begründet im unruhigen Flankenverlauf und den Materialanhäufungen auf den Spitzen der Zahnstruktur. Diese werden zum einen mit dem ersten Druckdurchgang eingeebnet und zum anderen werden die Hinterschneidungen ausgefüllt, die mit dem Konfokalmikroskop nicht aufgenommen werden können. Aufgrund des identischen Glättungsverlaufs Sa_n der Substratopographie W100, W120 und W135 bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden kann der Einfluss des freien Volumens der Substratopographien auf den Glättungsverlauf Sa_n und somit auf die Füllung als signifikant gering angenommen werden.

Da der Glättungsverlauf Sa_n aus Abbildung 6-8 bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einem mittleren Schichtauftrag h von $15\text{ }\mu\text{m}$ mit zunehmenden Druckdurchgang n innerhalb der ersten fünf Druckdurchgänge nahezu exponentiell verläuft und nicht konstant bleibt, lässt dies eine unterschiedliche Materialverteilung der Tinte auf den Substratopographien vermuten. Diese Vermutung wird mit REM Aufnahmen untersucht.

Nach dem ersten Druckdurchgang sammelt sich auf der Substratopographie W100, die einen Neigungswinkel β_{tilt} von 39° besitzt, nahezu die gesamte Tinte in den Tälern. Auf den Spitzen ist hingegen nur wenig Material vorhanden. Auf den Zahnflanken, zwischen den beiden Extrempunkten, liegt eine sehr dünne Schicht, die in einem Meniskus mündet, Abb. 6-9a. Die Verringerung des Neigungswinkels β_{tilt} auf 30° , den die Substratopographie W120 besitzt, zeigt, dass sich weiterhin der Großteil der Tinte in den Tälern sammelt und sich auf den Spitzen nahezu kein Material befindet. Die dünne Schicht zwischen den Spitzen und den Tälern, die einen Meniskus ausformen, ist schwach erkennbar. Der Meniskus ist, im Vergleich zu einer Substratopographie mit einem größerem Neigungswinkel β_{tilt} von 39° , schwächer ausgeprägt, Abb. 6-9b. Unabhängig von dem Neigungswinkel β_{tilt} sammelt sich die Tinte bei ausreichend hoher Nivellierungszeit t_N nahezu vollständig in den Tälern der Substratopographie. Dies bestätigt zusätzlich der Querschnitt der Substratopographie W135, die einen Neigungswinkel β_{tilt} von 19° besitzt. Trotz des geringen Öffnungswinkels α_{open} des Zahnes von 142° befindet sich kaum Tinte auf den Spitzen. Die Tinte ist innerhalb der Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden größtenteils in die Täler geflossen. Auf den Zahnflanken, zwischen den beiden Extrempunkten, liegt eine sehr dünne Schicht, die in einem Meniskus mündet, Abb. 6-5c. Mit einer größeren Anzahl an Schichten durch mehrere Druckdurchgänge, wird die unterschiedliche lokale Materialverteilung auf den Profilen stärker hervorgehoben. Nach zwei Druckdurchgängen sind theoretisch betrachtet circa 65 % des freien Volumens $V_{\text{frei, MF}}$ mit Tinte gefüllt. Dies stimmt näherungsweise mit dem Füllstand der Substratopographie W100, die einen Neigungswinkel β_{tilt} von 39° besitzt, überein. Die Tinte hat sich in den Tälern gesammelt und bildet dort einen Meniskus aus. Auf den Spitzen der Zahnstruktur ist weiterhin kaum Tinte verblieben. Zwischen den beiden Extremstellen zeigt sich, dass die Schichtdicke h an den

Zahnflanken stetig anwächst und nicht homogen vorliegt, Abb. 6-9d. Unabhängig von dem Neigungswinkel β_{tilt} verteilt sich die Tinte heterogen auf der Substrattopographie. Dies bestätigt sich nach dem zweiten Druckdurchgang der Substrattopographie W120, die einen geringen Neigungswinkel β_{tilt} von 29° besitzt. Auf den Spitzen ist geringfügig Tinte zu finden, deren Schichtdicke h entlang der Zahnflanke zunimmt bis sie in den Tälern ihr Maximum erreicht, Abb. 6-9e. Der Meniskus, der nach dem ersten Druckdurchgang bei einer Substrattopographie W135 noch schwach ausgeprägt war, ist nach dem zweiten Druckdurchgang nicht mehr erkennbar. Die Schichtdicke h der Tinte nimmt entlang der Zahnflanken ausgehend von der Spitze stetig zu bis die maximale Schichtdicke h_{Tal} im Tal erreicht wurde, Abb. 6-9f. Nach dem fünften Druckdurchgang ist die Substrattopographie W100 mit einem größeren Neigungswinkel β_{tilt} vollständig gefüllt. Die neue Topographie ist nicht geprägt durch einzelne Druckpunkte, sondern besitzt eine plane Konfiguration, Abb. 6-9g. Die Verringerung des Neigungswinkels β_{tilt} auf 30° , wie die Substrattopographie W120 besitzt, zeigt, dass sich nach dem fünften Druckdurchgang ebenfalls die Substrattopographie vollständig gefüllt hat. Die neue Topographie besitzt keine vereinzelt Druckpunkte, sondern eine nivellierte Tintenschicht, Abb. 6-9h. Diese nivellierte Tintenschicht, die die plane Konfiguration der neuen Topographie darstellt, stellt sich auch bei weiter zunehmendem Neigungswinkel β_{tilt} von 19° , wie die Substrattopographie W135 hat, ein, Abb. 6-9i.

Die REM Aufnahmen zeigen, dass die Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden ausreicht, die Tinte unabhängig von den gewählten Neigungswinkel β_{tilt} vollständig in die Täler der Substrattopographie fließen zu lassen.

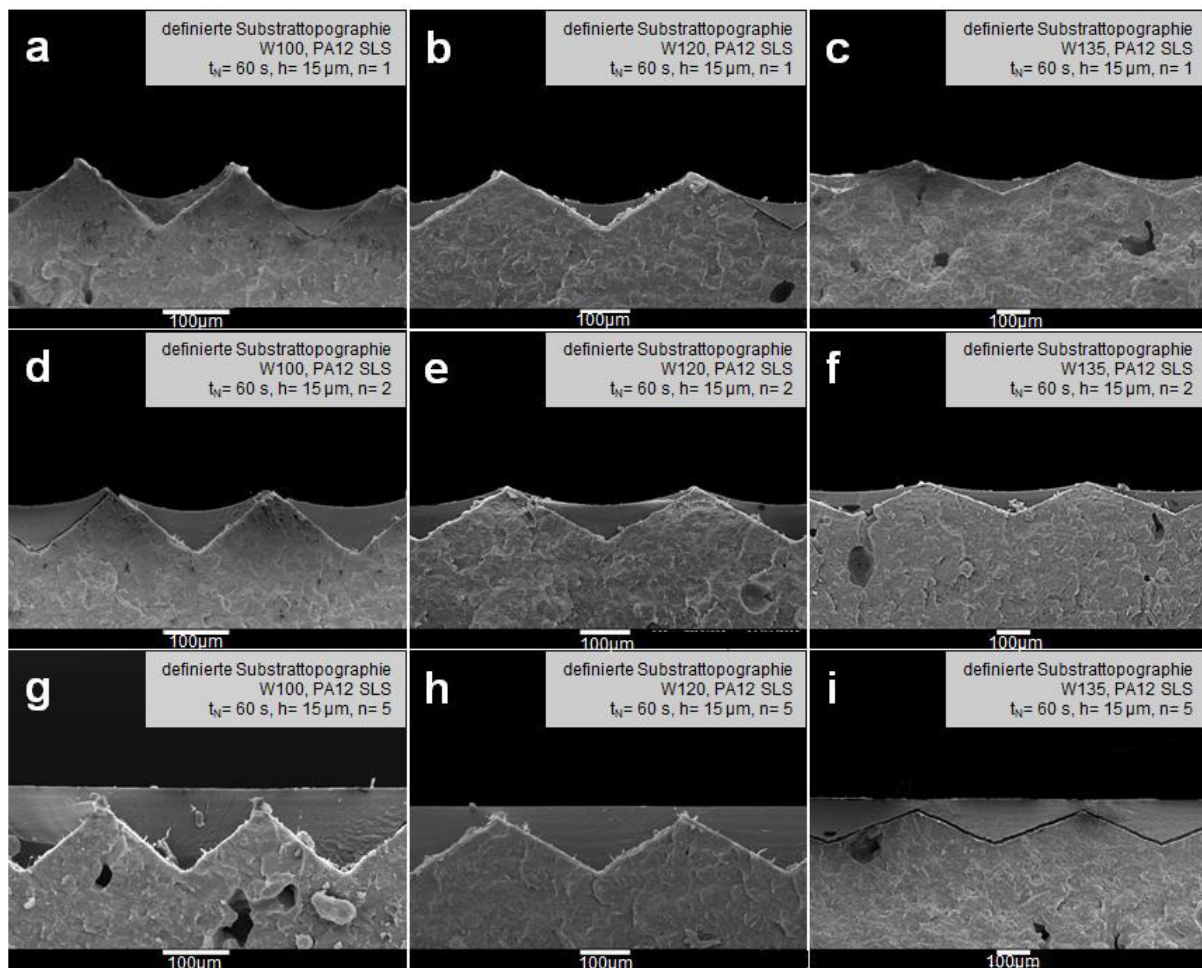


Abbildung 6-9: REM Aufnahmen nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 µm der definierten Substrattopographien a) W100 nach Druckdurchgang 1, b) W120 nach Druckdurchgang 1, c) W135 nach Druckdurchgang 1, d) W100 nach Druckdurchgang 2, e) W120 nach Druckdurchgang 2, f) W135 nach Druckdurchgang 2, g) W100 nach Druckdurchgang 5, h) W120 nach Druckdurchgang 5 und i) W135 nach Druckdurchgang 5.

Die homogene, mittlere Schichtdicke h auf dem Substrat liegt bei 15 µm, Abb. 6-10. Der Materialauftrag der Schichtdicke h_{Tal} liegt aufgrund des Fließverhaltens der Tinte im Tal zunächst über diesem Wert. Im ersten Druckdurchgang fließt auf der Substrattopographie W135 mehr Tinte in die Täler als die maximal mögliche Schichtdicke h_{Tal} im Tal von 30 µm zulässt. Hier liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal bei circa 35 µm. Die Schichtdicke h_{Tal} der Substrattopographie W120 liegt im Tal bei circa 50 µm. Diese Schichtdicke übersteigt ebenfalls die maximal mögliche Schichtdicke h_{Tal} im Tal von 30 µm, Abb. 6-10. Da die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie W100 nach dem ersten Druckdurchgang nicht berechnet werden konnte, liegt an der unruhigen Flankenverlauf und der Materialanhäufung auf der Spitze der Zahnstruktur, die eine Messung erschwert, Abb. 6-10. Nach dem zweiten Druckdurchgang wirkt sich die fehlende Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substrattopographie W100 aus dem ersten Druckdurchgang auf die folgende Schichtdicke h_{Tal} im Tal aus. Die Schichtdicke h_{Tal} im Tal liegt nach dem zweiten Druckdurchgang bei nahezu 90 µm und setzt

sich aus der aufaddierten Schichtdicke aus den ersten beiden Druckdurchgängen zusammen. Im Vergleich dazu, liegt die Schichtdicke h_{Tal} der Substrattopographie W120 und W135 im Tal mit 27 μm unter der maximal möglichen Schichtdicke h_{Tal} von 30 μm , Abb. 6-10. Nach dem dritten Druckdurchgang bleibt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal unabhängig von der Substrattopographie auf gleich hohem Niveau. Diese liegt bei 27 μm , Abb. 6-10. Ab dem vierten Druckdurchgang entspricht die Schichtdicke h_{Tal} der Substrattopographie W100 und W135 im Tal der mittleren Schichtdicke h von 15 μm . Ab dem fünften Druckdurchgang liegt die Schichtdicke h_{Tal} der Substrattopographie W120 im Tal ebenfalls bei circa 16 μm . Die Materialverteilung auf der Substrattopographie ist homogen, Abb. 6-10. In den fortlaufenden Druckdurchgängen fluktuiert die Schichtdicke h_{Tal} im Tal um 15 μm . Dies zeigt, dass eine homogene Materialverteilung auf der Substrattopographie stattfindet und es deutet darauf hin, dass die maximale Glättung nach vier Druckdurchgängen erreicht wurde, Abb. 6-10.

Dass die maximal möglichen Schichtdicke h_{Tal} im Tal von 30 μm in den ersten zwei Druckdurchgängen überstiegen wird, zeigt die Grenzen des Modells der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.13) auf. Das idealisierte zweidimensionale Modell der Substrattopographie geht davon aus, dass das Tal lediglich von zwei Richtungen mit Tinte gespeist wird. Die Tinte fließt hierbei ideal senkrecht hinab. Die reale dreidimensionale Substrattopographie besitzt jedoch, aufgrund des Fräsvorgangs, Unebenheiten entlang der Täler und Spitzen. Diese Unebenheiten können ein unerwünschtes Fließen der Tinte innerhalb des Tales und auf der Spitze zur Folge haben. Zudem weisen die Zahnflanken an sich, aufgrund des Fräswerkzeugs, Unebenheiten auf. Diese können ein nicht senkrecht gerichtetes Abfließen der Tinte bewirken, wodurch die lokale Rauheit R_z beeinflusst und somit die maximal mögliche Schichtdicke h_{Tal} aus dem zweidimensionalen Modell im Realen überstiegen werden kann. Dementsprechend kann, trotz der eigentlichen Volumenkonstanz, eine größere Schichtdicke h_{Tal} in dem Tal berechnet werden. Abgesehen von den ersten zwei Druckdurchgängen, zeigt sich, dass in dem Tal der Substrattopographien W100, W120 und W135 mit jedem Druckdurchgang eine gleich hohe Schichtdicke h_{Tal} im Tal zu finden ist.

Die Untersuchung des Einflusses des Öffnungswinkels α_{open} bzw. des Neigungswinkel β_{tilt} der definierten Substrattopographie W100, W120 und W135 bei einer sehr kurzen und einer ausreichend langen Nivellierungszeit t_N zeigt, dass das freie Volumen der unterschiedlichen Zahnstrukturen den Glättungsverlauf Sa_n nicht maßgeblich beeinflusst. Hingegen stellt sich heraus, dass mit abnehmendem Neigungswinkel β_{tilt} der einzelnen Zähne die Tinte langsamer fließt und den Glättungsverlauf Sa_n damit verändert.

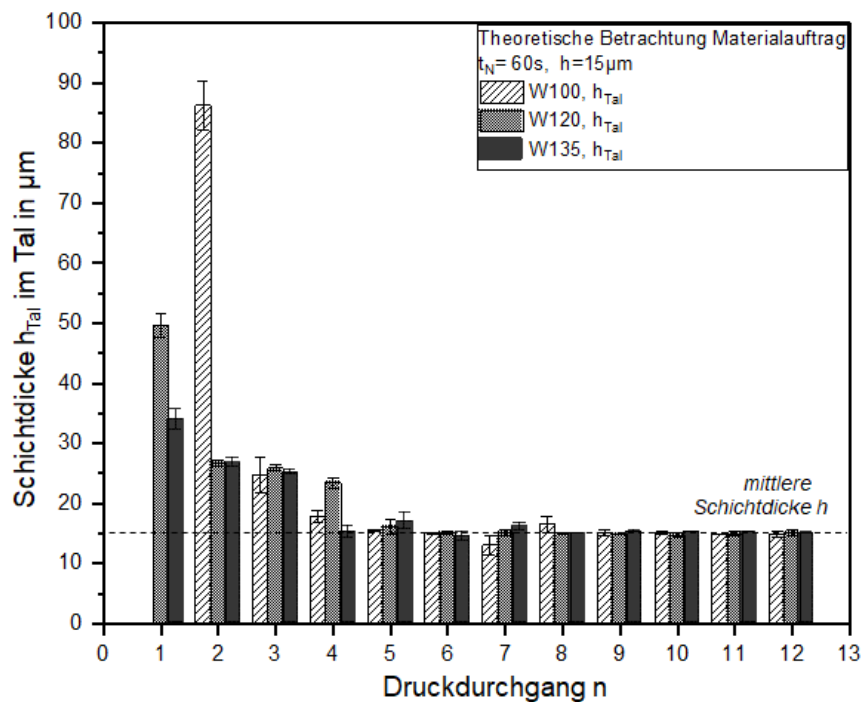


Abbildung 6-10: Theoretische Schichtdicke h_{Tal} im Tal (Gl. 5.13) der definierten Substrattopographie W100, W120 und W135 in Abhängigkeit des Druckdurchgang n bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einem mittleren Schichtdicke h von 15 μm .

6.1.2.2 Einfluss der undefinierten Substrattopographie

Eine undefinierte Substrattopographie besitzt eine Vielzahl an Neigungswinkeln β_{ilt} , die einer undefinierten Sequenz folgen. Die lasergesinterte Substrattopographie Ws1s entspricht einer solchen undefinierten Substrattopographie, da diese stochastisch verteilte Strukturelemente aufweist, Abb. 6-1 a/b. Die stochastische Verteilung der Strukturelemente erstreckt sich in drei Dimensionen, wodurch die Tinte, im Gegensatz zur definierten Substrattopographie, stärker innerhalb der drei Dimension variabel und willkürlich abfließt. Durch diese Umstände unterscheidet sich die Glättung der undefiniert Substrattopographie Ws1s von der definierten Substrattopographie W120.

Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der undefinierten, wie auch der definierten Substrattopographie, verläuft mit zunehmendem Druckdurchgang n nahezu exponentiell, Abb. 6-11. In den ersten fünf Druckdurchgängen nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der definierten Substrattopographie W120 nahezu linear ab. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n liegt innerhalb dieses Bereichs im Mittel bei circa 0,12 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Ab dem sechsten Druckdurchgang reduziert sich der Glättungsfortschritt ΔSa_n der definierten Substrattopographie W120 mit zunehmendem Druckdurchgang n , bis sich ab dem zehnten Druckdurchgang die arithmetische

Mittenrauheit Sa_{EST} bei einem Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von $0,13 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ einstellt, Abb. 6-11. Dies entspricht einer minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} von $3,66 \mu\text{m}$. Der nahezu lineare Abfall des Verhältnisses der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 zeigt sich bei der undefinierten Substrattopographie Wsls lediglich bis zum zweiten Druckdurchgang. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n liegt innerhalb dieses Bereichs im Mittel bei circa $0,18 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Ab dem dritten Druckdurchgang reduziert sich der Glättungsfortschritt ΔSa_n der undefinierten Substrattopographie mit zunehmendem Druckdurchgang n , bis sich ab dem zwölften Druckdurchgang die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} bei einem Verhältnis von $0,35 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ einstellt, Abb. 6-11.

Der Einfluss des Glättungsfortschritts ΔSa_n im nahezu linearen Bereich und die Erkenntnisse aus den Versuchen mit den definierten Substrattopographien (Abb. 6-4) lassen darauf schließen, dass der Öffnungswinkel α_{open} der undefiniert Substrattopographie Wsls im Durchschnitt kleiner als 120° bzw. der Neigungswinkels β_{tilt} im Durchschnitt größer als 30° ist. Im Allgemeinen lässt die Verringerung des Glättungsfortschritts ΔSa_n innerhalb des gesamten Bereichs mit zunehmendem Druckdurchgang n darauf schließen, dass die Tinte zunehmend langsamer in die Täler fließt. Dieses langsamere Fließen wurde aus vorherigen Untersuchungen auf den verringerten Neigungswinkels β_{tilt} zurückgeführt. Im Gegensatz zu der Zahnstruktur der definierten Substrattopographien besitzt das freie Volumen im Profil keine Trapezform, sondern die Flanken folgen einem Radius. Dieser ist auf die Kugelform der Pulverkörner, die als Strukturelemente identifiziert werden, zurückzuführen. Der Radius verursacht, dass sich die Geometrie des freien Volumens, die mit Tinte zu befüllen ist, mit jeder Schicht verändert. Der Radius bewirkt zudem unterschiedliche Neigungswinkel β_{tilt} an den Flanken zweier aneinandergrenzende Pulverkörner. Daraus folgt, dass im unbefüllten Tal der höchste Neigungswinkel β_{tilt} herrscht. Werden die Täler mit Tinte gefüllt, reduziert sich der maximale Neigungswinkel in dem neu ausgebildeten Tal. Der Neigungswinkel nimmt mit zunehmender Position auf dem Radius des kugelförmigen Strukturelements in Richtung des Scheitelpunkts weiter ab. Mit zunehmendem Druckdurchgang n und somit mit zunehmendem Füllstand der Tinte in den Tälern reduziert sich der Neigungswinkel β_{tilt} aufgrund der Position auf dem Radius der Pulverkörner. Ist der Neigungswinkel β_{tilt} zu gering, fließt die Tinte innerhalb der Nivellierungszeit t_N nicht mehr in die Täler und die Substrattopographie wird nicht weiter geglättet. Dies hat zu Folge, dass nicht die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie der minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_n aus dem Glättungsverlauf Sa_n entspricht, sondern die arithmetische Mittenrauheit Sa_n der Substrattopographie weiterhin auf die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_n Einfluss nimmt. Schlussfolgernd kann gesagt werden, dass die Abweichung der minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_n mit $5 \mu\text{m}$ der undefinierten Substrattopographie Wsls aus dem Glättungsverlauf Sa_n von der arithmetischen

Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie mit $3,66 \mu\text{m}$ auf die Form der Strukturelemente zurückzuführen ist.

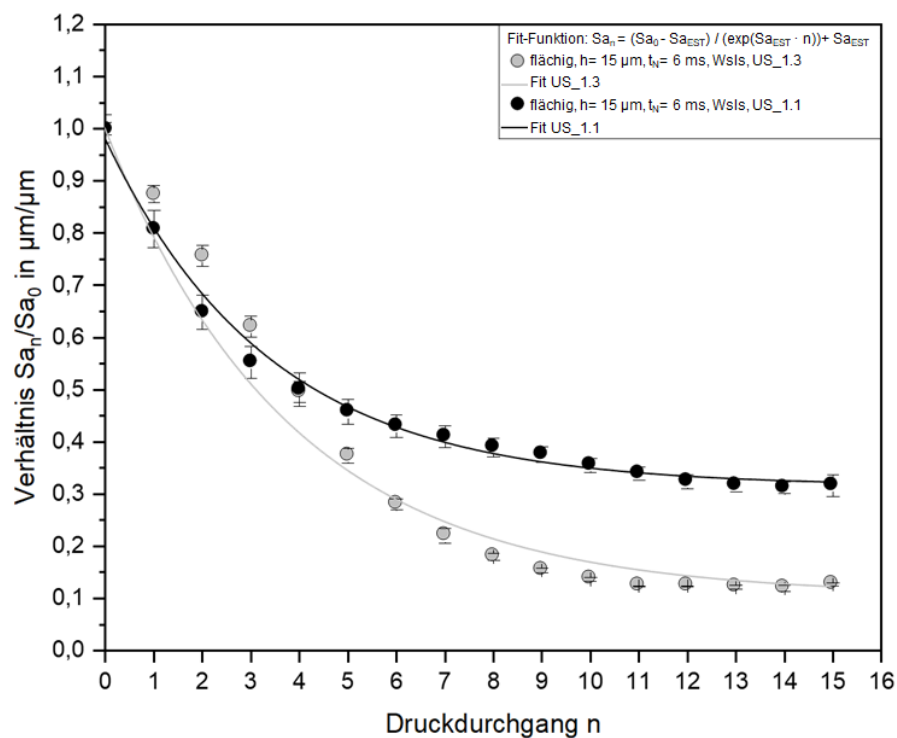


Abbildung 6-11: Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zu Sa_0 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden bei einem Schichtauftrag h von $15 \mu\text{m}$ unter den Einfluss der definierten Substratopographien (W120) und der undefinierten Substratopographie (Wsls) und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6).

Da das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der undefinierten Substratopographie nicht bekannt ist, wird dieses aus der Anzahl der benötigten Druckdurchgänge $n_{s,full}$ bis zur maximalen Füllung der Substratopographie bei ausreichend langer Nivellierungszeit t_N ermittelt. Hiermit soll der Einfluss der unterschiedlichen freien Volumina auf den Glättungsverlauf Sa_n zusätzlich betrachtet werden. Die Untersuchung der definierten Substratopographien hat gezeigt, dass sich durch Heraufsetzen der Nivellierungszeit t_N auf 60 Sekunden lediglich die Täler auffüllen. Diese sind vollständig aufgefüllt, sobald das aufgebrauchte Tintenvolumen V_{Tinte} dem freie Volumen $V_{frei,MF}$ der Substratopographie einer definierten Messfläche entspricht. Das Tintenvolumen V_{Tinte} wird dabei durch zunehmendem Druckdurchgang n erhöht, wodurch die, bis zum Einstellen der minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_n des Glättungsverlaufs Sa_n , benötigte Schichtanzahl Rückschlüsse auf das mögliche freie Volumen $V_{frei,MF}$ der undefinierten Substratopographie Wsls gibt.

Der Glättungsverlauf Sa_n der undefinierten, wie auch der definierten Substratopographie ist exponentiell, Abb. 6-12. In den ersten vier Druckdurchgängen nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der definierten Substratopographie W120 nahezu linear ab. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n liegt bei circa $0,25 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Ab dem fünften Druckdurchgang stellt sich ein Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von $0,05 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ein, das dem Verhältnis der minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} entspricht. Diese liegt umgerechnet bei $0,58 \mu\text{m}$. Es ist kein Glättungsfortschritt ΔSa_n vorhanden, Abb. 6-12. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 der undefinierten Substratopographie Wsls nimmt innerhalb des ersten Druckdurchgangs von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf $0,9 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Dies entspricht einem Glättungsfortschritt ΔSa_n von circa $0,1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Ab dem zweiten bis zum vierten Druckdurchgänge erhöht sich dieser Glättungsfortschritt ΔSa_n auf circa $0,25 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Glättungsverlauf Sa_n innerhalb dieser Druckdurchgänge ist nahezu linear. Ab dem fünften Druckdurchgang reduziert sich der Glättungsfortschritt ΔSa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n . Nach dem siebten Druckdurchgang stellt sich ein Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von $0,05 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ein, das dem Verhältnis der minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} entspricht, Abb. 6-12.

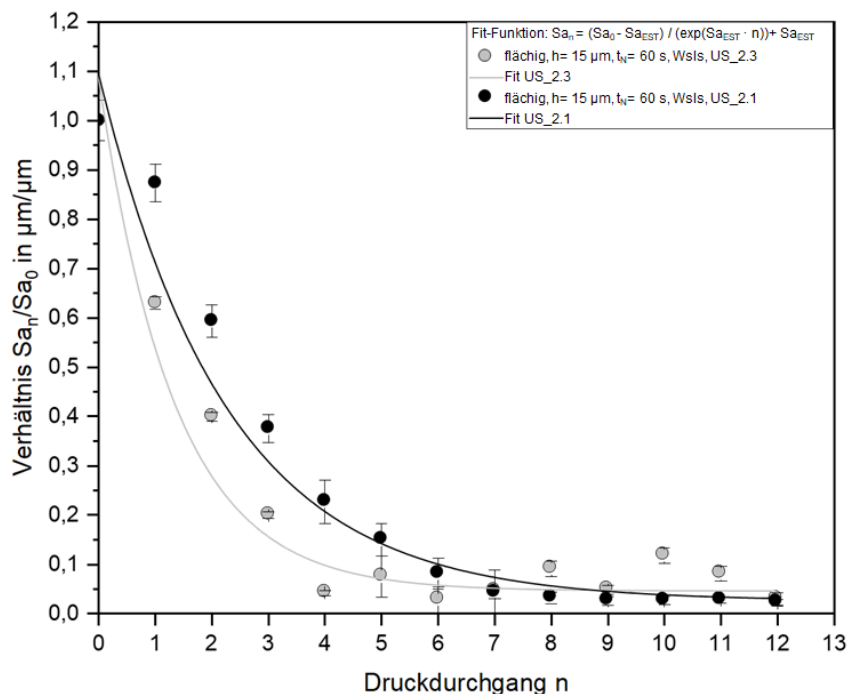


Abbildung 6-12: Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zu Sa_0 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden bei einem Schichtauftrag h von $15 \mu\text{m}$ unter den Einfluss der definierten Substratopographien (W120) und der undefinierten Substratopographie (Wsls) und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6).

Der geringe Glättungsfortschritt ΔSa_n der undefinierten Substrattopographie Wsls ist im Vergleich zur definierten Substrattopographie W120 auf die Form der Strukturelemente der Substrattopographie zurückzuführen. Die definierte Substrattopographie besitzt keine Hinterschneidungen, die durch die zahnförmigen Strukturelemente verursacht werden. Durch die halbkugelförmigen Strukturelemente der undefinierten Substrattopographie Wsls können solche Hinterschneidungen nicht ausgeschlossen werden. Da diese von dem Konfokalmikroskop nicht aufgenommen werden können, besitzt die Substrattopographie ein zusätzliches, undefiniertes Volumen, das von der Tinte zunächst aufgefüllt wird. Daraus folgt, dass in dem ersten Druckdurchgang nicht das gesamte aufgebrachte Tintenvolumen für die messbare Glättung der Täler zur Verfügung steht. Das sich der Glättungsfortschritt ΔSa_n der undefinierten Substrattopographie Wsls zwischen dem fünften und siebten Druckdurchgang lediglich langsam reduziert, anstatt sich abrupt einzustellen, kann erneut auf die halbkugelförmigen Strukturelemente zurückgeführt werden. Untersuchungen zu den Neigungswinkeln einzelner Strukturelemente der Substrattopographie in Kapitel 6.1.1 haben gezeigt, dass die Tinte langsamer fließt, wenn der Neigungswinkel β_{tilt} eines Strukturelements abnimmt. Die Halbkugelform der Strukturelemente der undefinierten Substrattopographie Wsls besitzt im Scheitelpunkt einen sehr geringen Neigungswinkel, bei dem die Tinte langsamer fließt. Dieses verlangsamte Fließen führt dazu, dass die Tinte innerhalb der Nivellierungszeit t_N nicht vollständig in die auszufüllenden Täler gelangt, sondern partiell auf den Spitzen stehen bleibt. Das gesamte Schichtdickenniveau nimmt zu, die Glättung schreitet langsamer voran und der Glättungsfortschritt ΔSa_n nimmt ab. Da die Nivellierungszeit t_N bei 60 Sekunden liegt und der Glättungsfortschritt ΔSa_n zwischen dem vierten und achten Druckdurchgang weiterhin exponential abnimmt, müssen die Strukturelemente an dem Scheitelpunkt zunehmend einen geringeren Neigungswinkel β_{tilt} als 19° besitzen.

Das aufgebrachte Tintenvolumen V_{Tinte} pro Druckdurchgang liegt bei $0,14 \text{ mm}^3$ pro $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Messfläche. Das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der definierten Substrattopographie W120 liegt bei $0,47 \text{ mm}^3$ pro $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Messfläche. Nach vier Druckdurchgängen liegt das aufgebrachte Tintenvolumen V_{Tinte} bei $0,56 \text{ mm}^3$ pro $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Messfläche. Das freie Volumen $V_{frei,MF}$ der definierten Substrattopographie W120 ist vollständig gefüllt und wurde um ein Volumen von $0,09 \text{ mm}^3$ auf einer Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ überfüllt. Umgerechnet auf die Messfläche von $3 \times 3 \text{ mm}^2$ entspricht dies einer Schichtdicke h von circa $10 \text{ }\mu\text{m}$, die die maximale Füllung der Substrattopographie übersteigt. Ab diesem Druckdurchgang stellt sich die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie ein. Dies entspricht dem Glättungsverlauf Sa_n der definierten Substrattopographie W120 mit zunehmendem Druckdurchgang. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie stellt sich bei der undefinierten Substrattopographie Wsls erst nach sieben Druckdurchgängen ein. Da das aufgebrachte Tintenvolumen V_{Tinte} pro Druckdurchgang bei $0,14 \text{ mm}^3$ pro $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Messfläche liegt, bedeutet dies, dass die

undefinierte Substrattopographie Wsls ein freies Volumen $V_{frei,MF}$ von $0,98 \mu\text{m}^3$ pro $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Messfläche besitzt. Diese Annahme gilt jedoch nur für eine exakt gefüllte Substrattopographie. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass die undefinierte Substrattopographie Wsls nach dem siebten Druckdurchgang bereits überfüllt wurde. Daraus folgt, dass das freie Volumen $V_{frei,MF}$ pro $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Messfläche zwischen dem sechsten und dem siebten Druckdurchgang liegen kann. Schlussfolgernd liegt das freie Volumen $V_{frei,MF}$ pro $3 \times 3 \text{ mm}^2$ Messfläche der undefinierten Substrattopographie Wsls in einem Bereich zwischen $0,84 \text{ mm}^3$ und $0,95 \text{ mm}^3$.

Die undefinierte Substrattopographie besitzt ein komplexes Zusammenspiel aus verschiedenen Neigungswinkeln β_{tilt} auf der Substrattopographie. Das freie Volumen der undefinierten Substrattopographie beeinflusst zusätzlich die maximal erreichbare Glättung.

6.1.3 Quintessenz

Die Substrattopographie definiert, wie schnell die Tinte von den lokalen Spitzen in die lokalen Täler fließt und dementsprechend, den Ort, an dem die Tinte an der Topographie stehen bleibt. Ist der Neigungswinkel β_{tilt} ausreichend groß, kann die gesamte Tinte in die lokalen Täler fließen. Allgemein kann der Glättungsverlauf Sa_n , der die Änderung der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n repräsentiert, in drei Abschnitte untergliedert werden, Abb. 6-13. Der nahezu lineare Abfall der Kurve im ersten Abschnitt gibt indirekt Auskunft über den Füllstand der Tinten im Tal, da die Täler mit zunehmender Schichtdicke der Tinte im Tal mehr gefüllt werden. Eine größere Schichtdicke der Tinte im Tal reduziert die arithmetische Mittenrauheit Sa_n stärker. Diese Abnahme verändert die Steigung m im ersten Abschnitt. Der zweite Abschnitt gibt indirekt Auskunft über die Form der Strukturelemente der Substrattopographie. Die Strukturelemente besitzen unterschiedliche Neigungswinkel β_{tilt} auf der Oberfläche. Verändert sich die Form der Strukturelemente, ändert sich der Neigungswinkel β_{tilt} , der wiederum das Fließverhalten der Tinte beeinflusst. Fließt zu wenig Tinte von den Spitzen in die Täler, reduziert sich die arithmetische Mittenrauheit Sa_n langsamer. Der dritte Abschnitt des Glättungsverlaufs Sa_n beschreibt die vorherrschende, dominierende Topographie, die sich bei einer konstanten arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} einstellt. Dieser Bereich stellt sich in der Regel ab dem Druckdurchgang $n_{s,full}$ ein, nach dem die Substrattopographie vollständig gefüllt bzw. überfüllt wurde.

Mit abnehmendem Neigungswinkel β_{tilt} der Substrattopographie sinkt die Steigung m des nahezu linearen Bereichs im ersten Abschnitt. Vergrößert sich der Neigungswinkel β_{tilt} der Strukturelemente auf der Substrattopographie, beschleunigt die Massekraft die Tinte während dem Fließvorgang stärker. Die Tinte erreicht in kürzerer Zeit die Täler und die arithmetische Mittenrauheit Sa_n wird stärker reduziert. Dieses zeichnet sich mit einer steigenden Steigung m aus. Mit abnehmendem Neigungswinkel β_{tilt} der Strukturelemente auf der Substrattopographie vergrößert sich der Radius r des zweiten Abschnittes. Ein geringer Neigungswinkel β_{tilt} der

Strukturelemente auf der Substratopographie verursacht ein langsames Fließen der Tinte. Fließt die Tinte langsamer, befindet sich neben der Tintenanhäufung im Tal auch Tinte auf den Spitzen. Dies hat zur Folge, dass die arithmetische Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n langsamer abnimmt, woraus ein vergrößerter Radius des Glättungsverlaufs Sa_n im zweiten Abschnitt resultiert. Ist die Substratopographie nach einem Druckdurchgang $n_{S,full}$ vollständig gefüllt, dominiert die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie, die sich im dritten Abschnitt bei einem konstanten Wert einstellt. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie wird von dem Neigungswinkel β_{tilt} der Strukturelemente auf der Substratopographie nicht beeinflusst. Ist der Neigungswinkel β_{tilt} der Strukturelemente auf der Substratopographie jedoch so gering, dass kein Fließen der Tinte ermöglicht ist, kann die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_n die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie übersteigen.

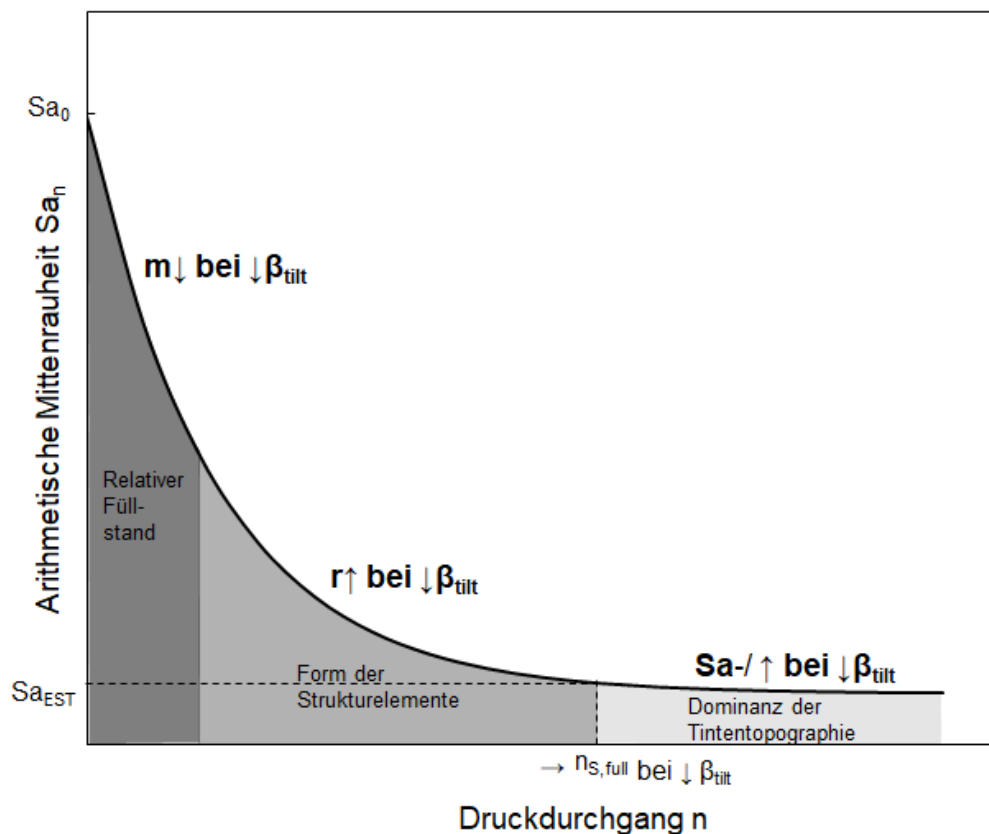


Abbildung 6-13: Schematische Darstellung des Einflusses des Neigungswinkels β_{tilt} der Strukturelemente auf der Substratopographie auf den Glättungsverlauf mit zunehmendem Druckdurchgang n . Die Steigung m des ersten Abschnitts nimmt mit abnehmenden Neigungswinkels β_{tilt} der Strukturelemente auf der Substratopographie ab. Der Radius des zweiten Abschnitts nimmt mit abnehmenden Neigungswinkels β_{tilt} der Strukturelemente auf der Substratopographie zu. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie bleibt mit abnehmendem Neigungswinkel β_{tilt} der Strukturelemente auf der Substratopographie gleich oder es bildet sich eine neue minimale Rauheit Sa , die größer als Sa_{EST} ist, aus. Die Anzahl der benötigten Druckdurchgänge $n_{S,full}$ wird zudem größer.

6.2 Einfluss der Nivellierungszeit auf den Glättungsverlauf

Aus dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) geht hervor, dass die Nivellierungszeit t_N , der Zeit zwischen dem Auftrag der Tinte auf das Substrat und dem tatsächlichen Aushärten der Tinte in einem definierten Zustand entspricht, Einfluss auf den Glättungsverlauf Sa_n nimmt. In den folgenden Unterkapiteln wird die Auswirkung des Fließverhaltens der Tinte auf die Tintentopographie analysiert. Im Anschluss wird der Einfluss der Nivellierungszeit t_N anhand des Modells der Glättung (Gl. 5.6) zunächst mit der Gleichung 5.6 theoretisch berechnet und im Anschluss mit realen Werten verifiziert.

6.2.1 Einfluss des Fließverhaltens der Tinte auf die Tintentopographie

Die maximale Glättung einer rauen Substrattopographie ist bei der Tintentopographie Sa_{EST} erreicht. Dementsprechend ist ein grundlegendes Verständnis über die Tintentopographie wichtig. Da die Tintentopographie erst bei einer geringen Substrattopographie relevant wird, wird der Einfluss des Fließverhaltens der Tinte auf die Tintentopographie auf ideal glatter Substrattopographie betrachtet.

Während dem Druckprozess werden Tröpfchen mit definierten Volumen V erzeugt, die auf das Drucksubstrat aufgebracht werden. Die Form der Tröpfchen wird als eine idealisierte Kugel angenommen, deren Volumen V mittels

$$V = \frac{4}{3}\pi r_K^3 \quad (6.1)$$

mit:

V	Volumen der Kugel,
r_K	Radius der Kugel

berechnet werden kann. Der Querschnitt der Kugel entspricht einem extrahierten Kreis, der das dreidimensionale Volumen in die Fläche projiziert. Die Fläche A_K des Kreises berechnet sich mit

$$A_K = \pi r^2 \quad (6.2)$$

mit:

A_K	Fläche des Kreises,
r	Radius des zeitabhängigen Kreises

aus dem Radius r_K des Tröpfchenvolumens V . Trifft das Tröpfchenvolumen auf das Substrat deformiert der ehemals kugelförmige Tropfen zu einem Druckpunkt. Die Fläche A_D des Druckpunktes entspricht, unter der Annahme, dass die Tinte nicht in das Substrat eindringt, der Fläche A_K des Kreises der Kugel, da das Volumen der Tinte nach dem Aufbringen unverändert bleibt, Abb. 6-14.

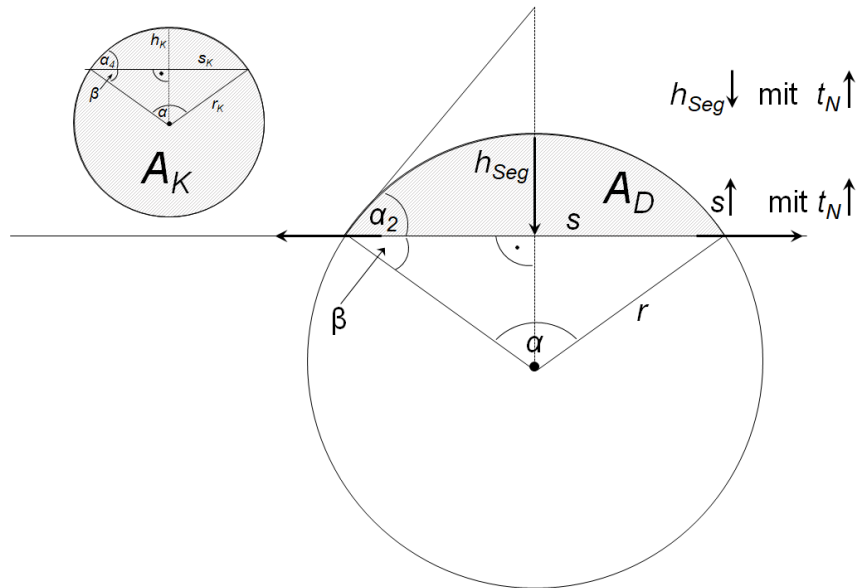


Abbildung 6-14: Schematische Darstellung des Spreitverhaltens eines Tintens Tropfens mit der Annahme, dass keine Penetration des Substrates durch die Tinte stattfindet.

Im Querschnitt entspricht die Form des Druckpunktes einem Kreissegment, dessen Ausgangsradius r des zugrundeliegenden imaginären Kreises mittels

$$r = \sqrt{\frac{2 A_D}{(\alpha - \sin(\alpha))}} \quad (6.3)$$

mit:

r	Radius Kreissegment,
A_D	Fläche des halbkugelförmigen Druckpunktes,
α	Öffnungswinkel des imaginären Kreises,

unter der Annahme, dass die Fläche A_D des Kreissegments der Querschnittsfläche A_K des Tropfens entspricht, ausgedrückt wird. Das Kreissegment wird aus einer definierter Kreissehne s und der definierten Segmenthöhe h_{Seg} gebildet. Die Kreissehne s des statisch vorherrschenden Druckpunktes zu einem definierten Zeitpunkt t_N wird mittels

$$s = r \cdot 2 \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (6.4)$$

mit:

s	Kreissehne Kreissegment,
r	Radius Kreissegment,
α	Öffnungswinkel des imaginären Kreises

berechnet und stellt die Kontaktfläche des Druckpunktes zum Substrat dar. Demgegenüber steht die Segmenthöhe h_{Seg} ,

$$h_{Seg} = \frac{s}{2} \tan\left(\frac{\alpha}{4}\right) \quad (6.5)$$

mit:

h_{Seg}	Segmenthöhe des imaginären Kreises,
s	Kreissehne Kreissegment,
α	Öffnungswinkel des imaginären Kreises,

die abhängig von der Kreissehne s ist und in die Tintentopographie mit eingeht.

Die Segmenthöhe h_{seg} und die Kreissehne s , die den Druckpunkt bilden, verändern sich mit zunehmender Nivellierungszeit t_N , da der Druckpunkt im unvernetzten, flüssigen Zustand spreitet. Spreitet der Druckpunkt, vergrößert sich dessen Kontaktfläche zum Substrat, die aus der Kreissehne s gebildet wird, und dessen Segmenthöhe h_{seg} wird folglich geringer. Dieses wirkt sich auf den Radius r und den Öffnungswinkel α des imaginären Kreises aus. Zusätzliche beeinflusst dieser dynamische Prozess den Kontaktwinkel α_2 zwischen Substrat und Tinte, der zur Berechnung des Öffnungswinkels α benötigt wird. Die experimentelle Untersuchung des Kontaktwinkels α_2 aus Versuch KW_1, zeigt dieses dynamische Verhalten eines Tropfens der Tinte LH-100-W mit einem Volumen von 120 μl in Abhängigkeit der Nivellierungszeit t_N .

Der Tintentropfen wird mit einer definierten Geschwindigkeit auf das Substrat gebracht, dessen Energie durch den Aufprall des Tröpfchens freigesetzt wird. Durch die freigesetzte Energie verändert sich zunächst die Gestalt des Kreissegments s sequenziell, bis sie sich in der Halbkugelform, dem energetisch günstigsten Zustand, einpendelt, Abb. 6-15. Es bildet sich ein stabiler Kontaktwinkel α_2 aus. Die Messung der Nivellierungszeit t_N startet, wenn sich der Druckpunkt ausgependelt und der Kontaktwinkel α_2 einen stabilen Wert erreicht hat. Mit zunehmender Nivellierungszeit t_N spreitet der Druckpunkt, durch die treibenden Drücke im und um den Tintenfilm, weiter. Der Kontaktwinkel α_2 wird mit zunehmender Nivellierungszeit t_N kleiner und der Gradient zwischen der Segmenthöhe h_{seg} in der Mitte des Druckpunktes wird zum äußeren Ende hin geringer. Der Kontaktwinkel α_2 nimmt über die Nivellierungszeit t_N in der ersten Sekunde rapide ab, Abb. 6-15. Während sich die Kreissehne s , die die Kontaktfläche zum Substrat darstellt, gleichmäßig vergrößert, nimmt die Segmenthöhe h_{seg} an der maximalen Stelle mit zunehmender Nivellierungszeit t_N ab. Zwischen einer Nivellierungszeit t_N von einer und vier Sekunden reduziert sich die Triebkraft zum Spreiten in dem Tropfen, wodurch sich die Fließgeschwindigkeit zunehmend verringert. Nach einer Nivellierungszeit t_N von circa fünf Sekunden verändert sich der Kontaktwinkel α_2 nicht mehr signifikant, wodurch keine relevante Veränderung des Gradienten zwischen der Segmenthöhe h_{seg} und der Randbereiche mehr zu erwarten ist. Daraus resultiert, dass sich nach einer Nivellierungszeit t_N von fünf Sekunden ein relativ konstanter Kontaktwinkel α_2 von circa 10° einstellt, Abb. 6-15. Dieser beruht auf der Oberflächenspannung der Tinte. Während die Tinte den energetisch günstigsten Zustand in Form der Halbkugel anstrebt, treibt der Druck den Tintenfilm auseinander. Liegen beide im Gleichgewicht, findet keine weitere Veränderung mehr statt.

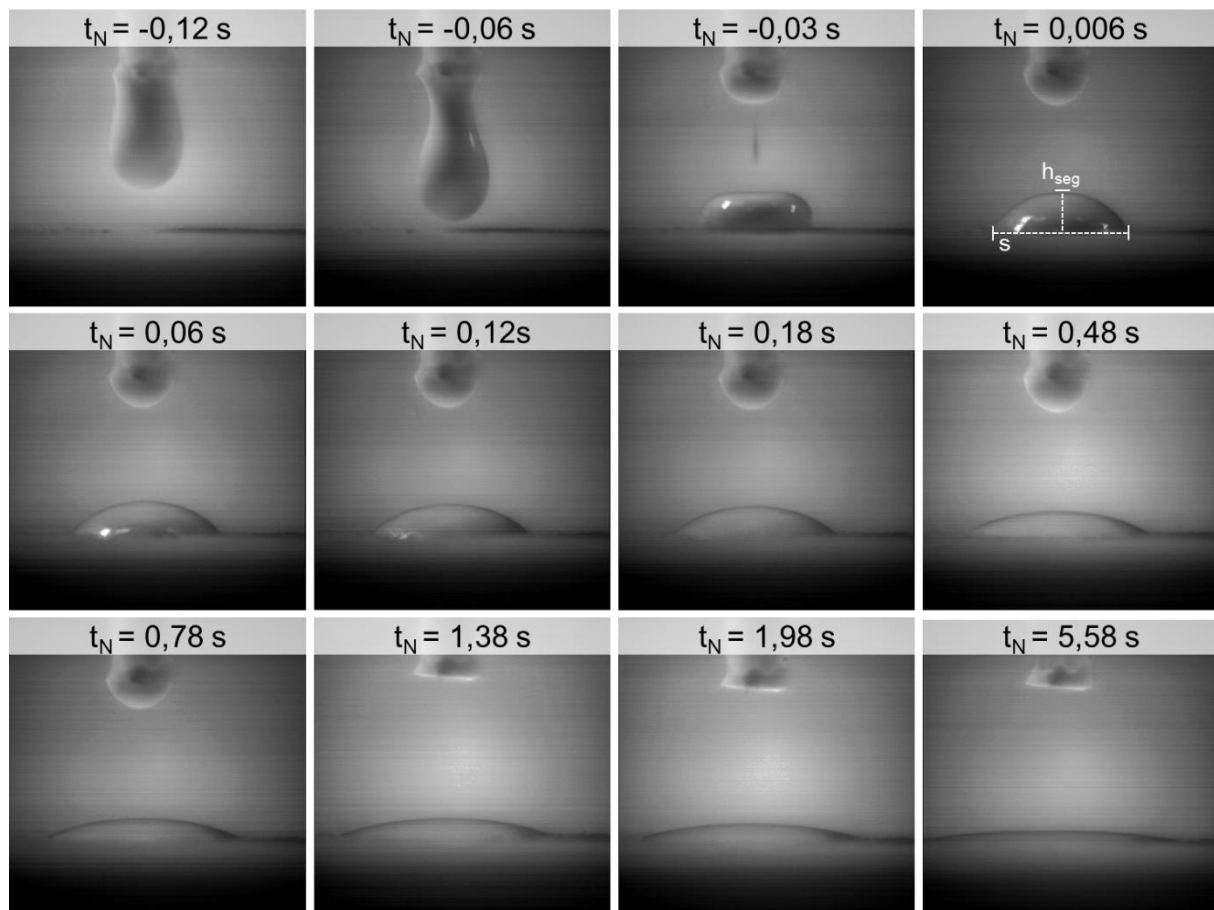


Abbildung 6-15: Aufnahmen des spreitenden Tropfens bei einem Tintenvolumen von $120\ \mu\text{l}$ auf der geglätteten Substrattopographie. Nach anfänglicher Fluktuation pendelt sich eine definierte Segmenthöhe h_{seg} und Kreissehne s , die die Kontaktfläche zum Substrat darstellt, ein. Die Kreissehne s nimmt mit zunehmender Nivellierungszeit t_N zu, während die Segmenthöhe h_{seg} reduziert wird.

Der Kontaktwinkel α_2 nimmt mit zunehmender Nivellierungszeit t_N exponentiell ab, Abb. 6-16. Innerhalb einer Nivellierungszeit t_N von 0,5 Sekunden nimmt der Kontaktwinkel α_2 um circa 15° von 55° auf 30° ab. Nach weiteren 0,5 Sekunden reduziert sich der Kontaktwinkel α_2 um 10° von 30° auf 20° . In den folgenden vier Sekunden schwächt sich der Kontaktwinkel α_2 weiter ab, bis sich nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Sekunden ein konstanter Kontaktwinkel α_2 von circa 10° einstellt, Abb. 6-16. Der Verlauf des Kontaktwinkels α_2 in Abhängigkeit der Nivellierungszeit t_N wird mit einer exponentiellen Fit-Funktion angenähert.

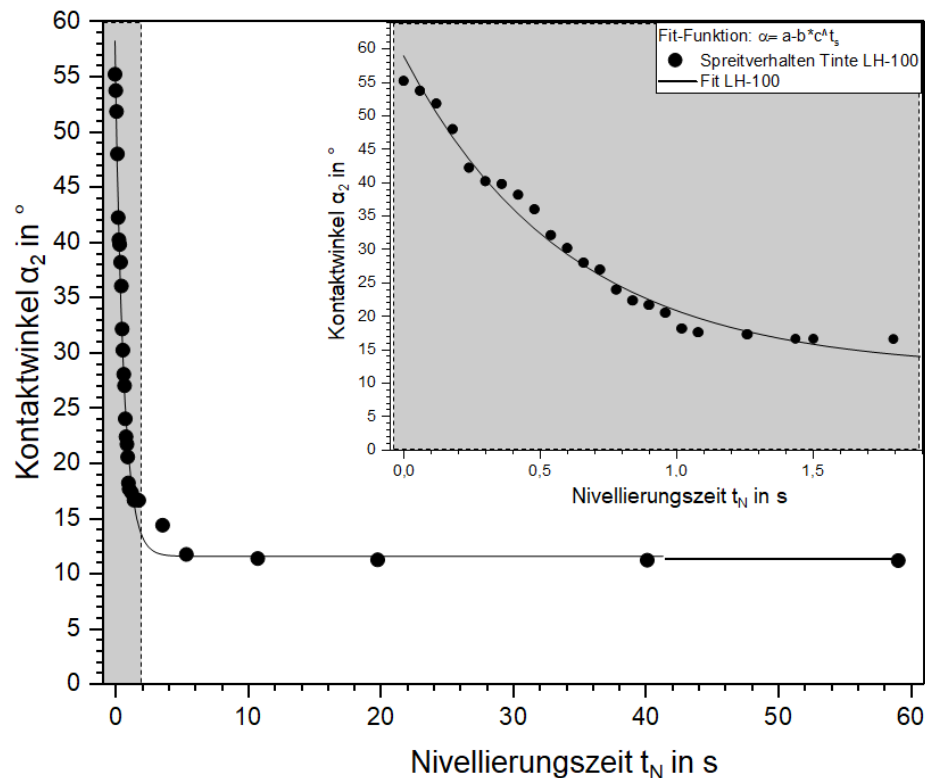


Abbildung 6-16: Kontaktwinkel α_2 in Abhängigkeit der Nivellierungszeit t_N eines Tintentropfens mit einem Volumen von $120 \mu\text{l}$ auf einer PA12 Platte, die mit zehn Druckdurchgängen im Inkjet geglättet wurde.

Die Gleichung der Fit-Funktion, nach der sich der Kontaktwinkel α_2 mit zunehmender Nivellierungszeit t_N verändert, entspricht näherungsweise der Gleichung

$$\alpha_2(t_N) = (11,0 + 47,5 \cdot 0,2^{t_N}) \cdot \frac{180}{\pi} \quad (6.6)$$

mit:

α_2 Kontaktwinkel zwischen Tinte und Substrat,
 t_N Nivellierungszeit

in der Einheit rad.

Aus Abbildung 6-14 geht hervor, dass der Kontaktwinkel α_2 dem halben Öffnungswinkel α des rechtwinkligen Dreiecks entspricht. Da der Druckpunkt spiegelsymmetrisch zur Ordinatenachse ist, ist der Kontaktwinkel α_2 links und rechts von der Achse nahezu identisch. Daraus folgt die Bildung eines gleichschenkligen Dreiecks mit dem Öffnungswinkel α , der das Dreieck aufspannt. Die Ecken werden aus den beiden äußeren Randpunkten gebildet. Geteilt entspricht dieses Dreieck einem rechtwinkligen Dreieck, aus dem der Öffnungswinkel α berechnet werden kann. Der Öffnungswinkel α des imaginären Kreises entspricht dem doppelten Kontaktwinkel α_2 , wodurch die dynamische Veränderung der Form des Druckpunktes dargestellt werden kann.

Aus dem Volumen V der Gleichung 6.1 kann die Fläche A_K des Kreises mit der Gleichung 6.2 berechnet werden. Wird diese mit Berücksichtigung des dynamischen Kontaktwinkels α_2 aus der Gleichung 6.6 in die Gleichung 6.3 eingesetzt, ergibt sich der zeitabhängige Radius r des imaginären Kreises. Der zeitabhängige Zusammenhang der Kreissehne s des Druckpunktes wird mittels

$$s = \sqrt{\left[\frac{2 \pi \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{\frac{2}{3}}}{(22,0 + 95 \cdot 0,2 \cdot t_N) - \sin(22,0 + 95 \cdot 0,2 \cdot t_N)} \right]} \cdot 2 \sin\left(\left[11,0 + 47,5 \cdot 0,2 \cdot t_N\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right) \quad (6.7)$$

mit:

s	Kreissehne,
V	Volumen des Tröpfchens,
t_N	Nivellierungszeit

berechnet, indem der zeitabhängige Radius r aus der Gleichung 6.3 und der dynamische Kontaktwinkel α_2 mit der Gleichung 6.6 in die Gleichung 6.4 der Kreissehne s eingesetzt wird. Aus dem zeitabhängigen Zusammenhang der Kreissehne s des Druckpunktes ergibt sich die zeitabhängige Segmenthöhe h_{seg}

$$h_{seg} = \frac{\sqrt{\left[\frac{2 \pi \left(\frac{3V}{4\pi} \right)^{\frac{2}{3}}}{(22,0 + 95 \cdot 0,2 \cdot t_N) - \sin(22,0 + 95 \cdot 0,2 \cdot t_N)} \right]} \cdot 2 \sin\left(\left[11,0 + 47,5 \cdot 0,2 \cdot t_N\right] \cdot \frac{180}{\pi}\right)}{2} \cdot \tan\left(\frac{\left[11,0 + 47,5 \cdot 0,2 \cdot t_N\right] \cdot 45}{\pi}\right) \quad (6.8)$$

mit:

h_{Seg}	Segmenthöhe,
V	Volumen des Tröpfchens,
t_N	Nivellierungszeit

des Druckpunktes, die mit dem dynamischen Kontaktwinkel α_2 aus der Gleichung 6.6 in die Gleichung 6.5 der Segmenthöhe h_{seg} eingesetzt wird. Es wird ersichtlich, dass die ausschlaggebenden Größen die Nivellierungszeit t_N und das Tröpfchenvolumen V aus dem Inkjet-Druck sind. Da das Tröpfchenvolumen V im Inkjet-Druck definiert ist, kann die Veränderung der Kreissehne s und der Segmenthöhe h_{seg} in Abhängigkeit der Zeit t_N qualitativ dargestellt werden.

Das Tintentröpfchen, das im Inkjet-Druck erzeugt wird, besitzt ein durchschnittliches Volumen V von $12 \cdot 10^3 \mu\text{m}^3$. Unter der Annahme einer idealen Kugel kann der Radius r_K mit Hilfe der Gleichung 6.1 berechnet werden. Der Radius r des imaginären Kreises des durchschnittlichen Druckpunktes liegt bei $14 \mu\text{m}$ und entspricht dem Radius r des maximalen Kreises der Kugel. Dieser Radius umspannt die Fläche A_K des Kreises (Gl. 6.2), die bei $634 \mu\text{m}^2$ liegt. Nach Gleichung 6.8 kann diese in Abhängigkeit der Nivellierungszeit t_N theoretisch berechnet werden.

Die Kreissehne s eines einzelnen Druckpunktes auf ebenmäßig glatter Oberfläche vergrößert sich innerhalb der ersten drei Sekunden rasch, Abb. 6-17. Dies erfolgt bis zu einer Nivellierungszeit t_N von drei Sekunden. Nach drei Sekunden stagniert die Kreissehne s und

der Druckpunkt spreitet nicht weiter. Der Druckpunkt benetzt das Substrat entsprechend der Kreissehne s in einer Länge von circa $300\text{ }\mu\text{m}$, Abb. 6-17.

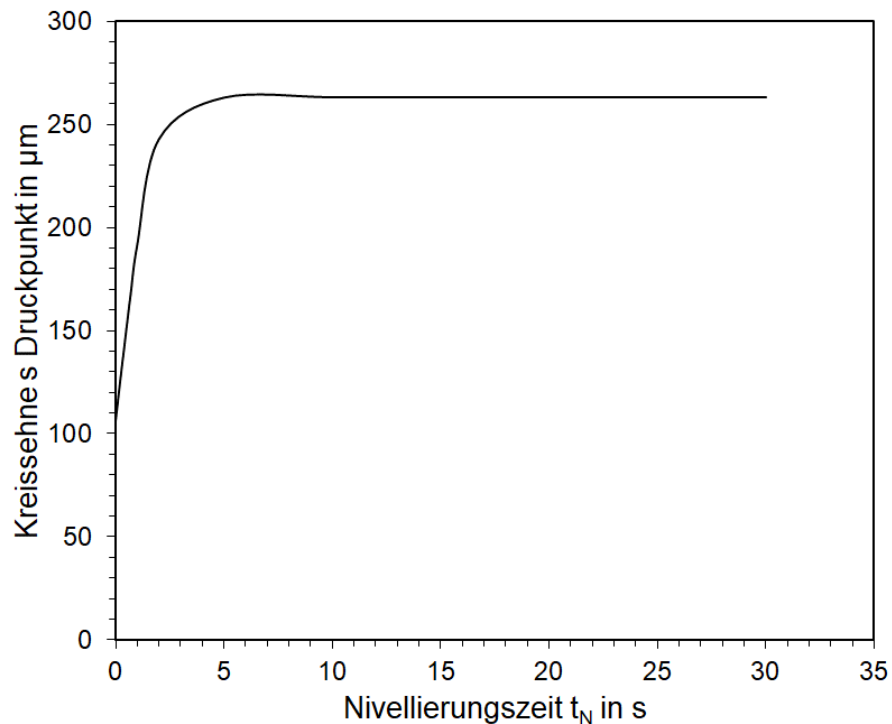


Abbildung 6-17: Prinzipieller Verlauf der Kreissehne s eines Druckpunktes mit zunehmender Nivellierungszeit t_N .

Die zeitliche Veränderung der Segmenthöhe h_{Seg} , die mit der zeitlichen Veränderung der Kreissehne s korreliert, wird mit Gleichung 6.9 berechnet.

Innerhalb der ersten zwei Sekunden der Nivellierungszeit t_N nimmt die Segmenthöhe h_{Seg} des Druckpunktes um die Hälfte von $16\text{ }\mu\text{m}$ auf $8\text{ }\mu\text{m}$ ab. Bei dieser Segmenthöhe h_{Seg} stagniert die Reduktion. Die Stagnation der Segmenthöhe h_{Seg} korreliert mit der Stagnation der Kreissehne s des Druckpunktes bei einer Nivellierungszeit t_N von drei Sekunden, Abb. 6-18.

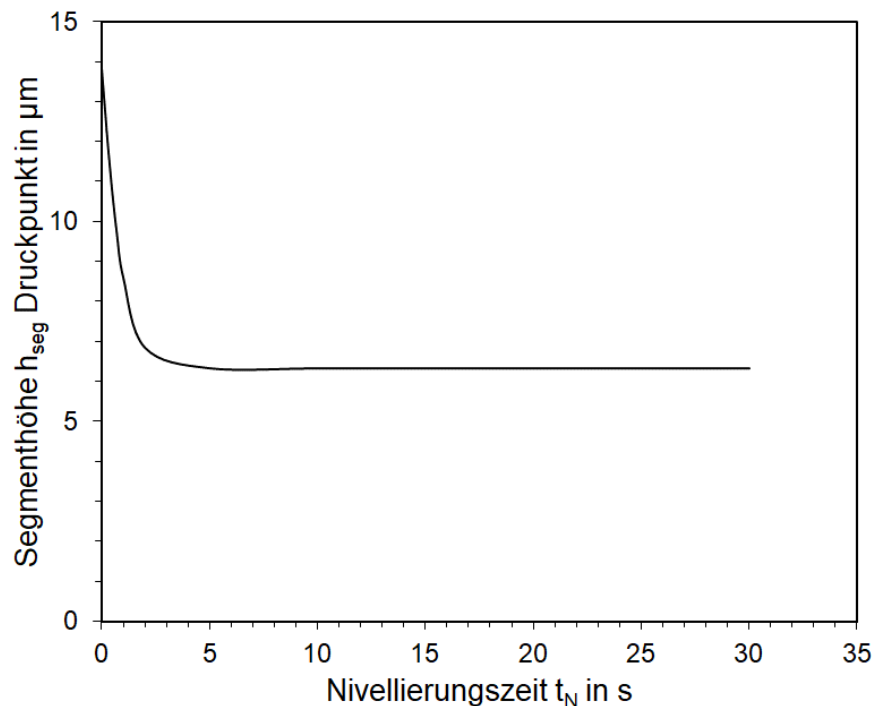


Abbildung 6-18: Prinzipieller Verlauf der Segmenthöhe h_{seg} eines Druckpunktes mit zunehmender Nivellierungszeit t_N .

Aus der Gleichung 6.8 für die Kreissehne s und der Gleichung 6.9 für die Segmenthöhe h_{seg} kann die Form eines einzelnen Druckpunktes mit zunehmender Nivellierungszeit t_N simuliert werden. Zunächst besitzt der Druckpunkt eine anfängliche Segmenthöhe h_{seg} und eine anfängliche Kreissehne s . Mit zunehmender Nivellierungszeit t_N nimmt die Segmenthöhe h_{seg} ab und die Kreissehne s zu. Die anfangs stark gekrümmte Oberfläche des Druckpunktes nimmt mit zunehmender Nivellierungszeit t_N ebenfalls ab, Abb. 6-19. Dieser qualitative Verlauf entspricht dem experimentell gezeigten Verlauf eines Tropfens aus Abbildung 6-15.

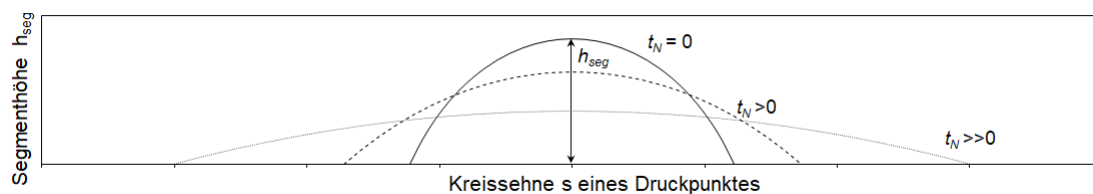


Abbildung 6-19: Einfluss der Nivellierungszeit t_N auf die Tintentopographie nach einer Nivellierungszeit t_N gleich 0 Sekunden, einer Nivellierungszeit t_N von größer 0 Sekunden und einer Nivellierungszeit t_N wesentlich größer als 0 Sekunden. Die Kreissehne s des Druckpunktes nimmt zu und die Segmenthöhe h_{seg} eines Druckpunktes nimmt mit zunehmender Nivellierungszeit t_N ab.

Die Tintentopographie entspricht nicht einem singulären Druckpunkt, sondern bildet eine Vielzahl an Druckpunkten ab. Sie beinhaltet die Anzahl an Druckpunkten, die sich aus der Auflösung des Druckes ergibt. Aus der Auflösung kann der Druckpunkt Abstand berechnet

werden. Der Druckpunkt Abstand d bei einer Auflösung von 600 x 600 dpi liegt bei circa 42 μm . Bei einer berechneten Kreissehne s eines einzelnen Druckpunktes von mindestens 100 μm führt dieser Druckpunkt Abstand zu einer Überlappung nebeneinanderstehender Druckpunkte, wodurch ein geschlossener Film entsteht. Durch die überlappenden Druckpunkte, entsteht mikroskopisch eine charakteristische Topographie, die die Tintentopographie darstellt. Ein Druckpunkt besitzt eine Segmenthöhe h_{Seg} . Die Form entspricht einer Halbkugel mit starker Krümmung. Der nebenliegende Druckpunkt besitzt die identische Halbkugelform mit gleicher Segmenthöhe h_{Seg} . Aufgrund des geringen Druckpunkt Abstandes überlappen beide Druckpunkte, wodurch ein Schnittpunkt $h_{\text{Seg},x}$ zwischen den beiden Druckpunkten entsteht, Abb. 6-20a. Der Schnittpunkt befindet sich an einer definierten Segmenthöhe $h_{\text{Seg},x}$. Die Tintentopographie wird durch die Segmenthöhe h_{Seg} einzelner Druckpunkte und der Schnittpunkte zwischen aufeinanderfolgenden Druckpunkten $h_{\text{Seg},x}$ gebildet. Mit zunehmender Nivellierungszeit t_N nimmt die Segmenthöhe h_{Seg} eines Druckpunktes ab, wodurch sich die Schnittstelle $h_{\text{Seg},x}$ zwischen zwei aufeinanderfolgenden Druckpunkte annähert. Die Abgrenzung der einzelnen Druckpunkte verläuft und der Film wird ebenmäßiger. Die Differenz zwischen der Segmenthöhe h_{Seg} der einzelnen Druckpunkte und der Schnittpunkte $h_{\text{Seg},x}$ wird geringer, wodurch die Ausprägung der Tintentopographie abnimmt. Einzelne Druckpunkte sind schwer zu erkennen, Abb. 6-20b.

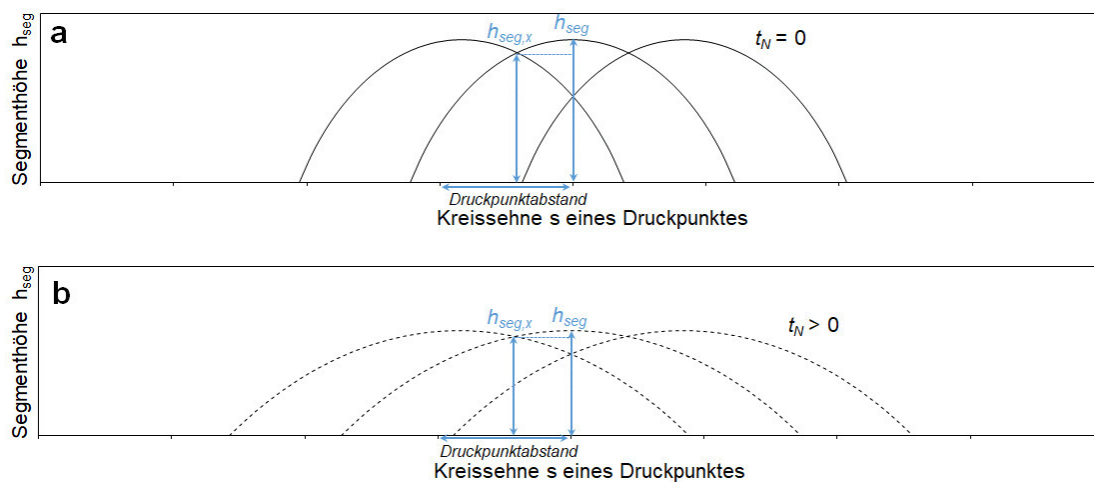


Abbildung 6-20: Einfluss der Nivellierungszeit t_N auf die Tintentopographie nach a) einer Nivellierungszeit t_N gleich 0 Sekunden und b) einer Nivellierungszeit t_N von größer 0. Die Kreissehne s des Druckpunktes nimmt zu und die Segmenthöhe h_{Seg} eines Druckpunktes nimmt mit zunehmender Nivellierungszeit t_N ab. Der Schnittpunkt zweier Druckpunkte $h_{\text{Seg},x}$ nähert sich der Segmenthöhe h_{Seg} eines einzelnen Druckpunktes an.

Die Segmenthöhe h_{Seg} eines einzelnen Druckpunktes beschreibt nicht die Tintentopographie. Die Tintentopographie entsteht durch die Überlagerung einzelner Druckpunkte, die im gleichen Maße ausgeprägt sind. Aus dem Fließverhalten der Tinte zeigt sich, dass die Nivellierungszeit t_N das Glättungsergebnis beeinflusst.

6.2.2 Verlaufssimulation der minimal benötigten Nivellierungszeit

Die Tintentopographie und somit die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} ist abhängig von der Nivellierungszeit t_N . Eine geringe Nivellierungszeit t_N reduziert mögliche Prozesszeiten. Aus dem Zusammenhang dieser beiden Parameter kann das Glättungs-Zeit-Verhältnis ermittelt werden. Zusätzlich dient die Simulation der minimal benötigten Nivellierungszeit t_N , die Ergebnisse der experimentell verwendeten Nivellierungszeiten t_N einzusortieren.

Das Modell der Glättung (Gl. 5.6) demonstriert die Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n . Die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_n beschreibt die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie. Die Tintentopographie ist in der ganzheitlichen Betrachtung des Modells der Glättung ein statischer Zustand, da die Tinte in einem definierten Zustand nach einer definierten Nivellierungszeit t_N vernetzt wird. Die minimal benötigte Nivellierungszeit t_N hängt mit dem Fließverhalten der Tintentopographie zusammen.

Die theoretische Berechnung der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie mit Hilfe der Gleichung 5.2 in Abhängigkeit der Nivellierungszeit t_N zeigt, dass ab einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden die kleinstmögliche arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} von $0,7\text{ }\mu\text{m}$ erreicht wird. Mit zunehmender Nivellierungszeit t_N nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} nicht weiter ab und stagniert. Wird die Nivellierungszeit t_N verkürzt, steigt die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} exponentiell an. Eine Nivellierungszeit t_N von 10 Sekunden erhöht die arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} auf $1,5\text{ }\mu\text{m}$. Die Tintentopographie besitzt bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden bereits eine arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} von $3,7\text{ }\mu\text{m}$. Unter Berücksichtigung der möglichen Schwankungen der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} aufgrund von Defekten, zeigt die theoretische Berechnung, dass eine Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden ausreicht, um das Glättungsergebnis mit der geringsten arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} zu erzielen. Die Fitfunktion nach dem Modell der Tintentopographie (Gl. 5.2) wird von den experimentellen Werten bestätigt, Abb. 6-21.

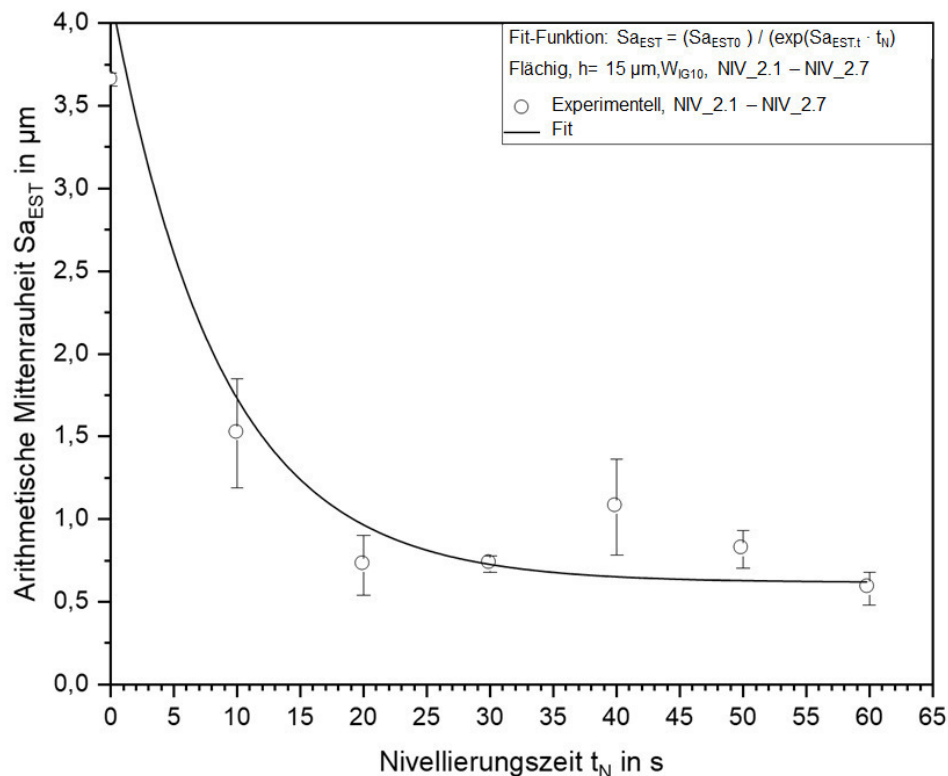


Abbildung 6-21: Simulation des Glättungsverlaufs Sa_{EST} der arithmetischen Mittenrauheit der Tintentopographie in Abhängigkeit der Nivellierungszeit t_N bei einer Schichtdicke h von $15 \mu m$ nach der Gleichung (5.2) des Modells der Tintentopographie (Linie) und Verifizierung dieses Verlaufs mit den experimentellen Ergebnissen für die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} (Punkte) aus den Versuchen NIV_2.1 bis NIV_2.7.

Das Fließverhalten der Tinte auf der definierten Substrattopographie W120 unter Verwendung unterschiedlicher Nivellierungszeiten t_N spiegelt sich in dem mit dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) theoretisch berechneten Glättungsverlauf Sa_n in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n wider. Aus der Fitfunktion nach Gleichung 5.2 ergibt sich eine anfänglich dominierende Wellenlänge λ_{EST0} der Tintentopographie von $0,29 \text{ mm}$. Diese wird für die theoretische Berechnung herangezogen.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt mit zunehmenden Druckdurchgang n exponentiell ab, Abb. 6-22. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit fortschreitendem Druckdurchgang n abflacht.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von $30 \mu m$ auf $26 \mu m$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei $4 \mu m$ und entspricht einem auf die Ausgangsrauheit Sa_0 normierten Glättungsfortschritt ΔSa_n von $0,13 \mu m/\mu m$. Im gesamten Glättungsverlauf nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von $30 \mu m$ auf circa $6 \mu m$ ab. Die anfängliche arithmetische

Mittenrauheit Sa_n reduziert sich um circa 80 %, Abb. 6-22. Liegt die Nivellierungszeit t_N der Tinte bei einer Sekunde, reduziert sich die arithmetische Mittenrauheit Sa_n während dem Glättungsverlauf von 30 μm auf circa 4 μm . Dies entspricht einer Abnahme von 87 % der anfänglichen arithmetischen Mittenrauheit Sa_0 nach dem zwölften Druckdurchgang. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n nach dem ersten Druckdurchgang liegt bei 7 μm und entspricht einem auf die Ausgangsrauheit Sa_0 normierten Glättungsfortschritt ΔSa_n von 0,23 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$, Abb. 6-22. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt bei einer Nivellierungszeit t_N von 10 Sekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 20 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 10 μm und entspricht einem auf die Ausgangsrauheit Sa_0 normierten Glättungsfortschritt ΔSa_n von 0,33 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 3 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 90 % und wird nach dem zehnten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-22. Steigt die Nivellierungszeit t_N auf 20 Sekunden nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 12 μm ab. Dies entspricht einem Glättungsfortschritt ΔSa_n im ersten Druckdurchgang von 18 μm und einem auf die Ausgangsrauheit Sa_0 normierten Glättungsfortschritt ΔSa_n von 0,40 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 nimmt während dem gesamten Glättungsverlauf Sa_n von 30 μm auf 2 μm . Sie reduziert sich während dem gesamten Glättungsverlauf Sa_n um circa 93 % und wird nach dem fünften Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-22. Nach einer Nivellierungszeit t_N von 40 Sekunden nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 6 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 24 μm und entspricht einem auf die Ausgangsrauheit Sa_0 normierten Glättungsfortschritt ΔSa_n von 0,8 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 3 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 90 % und wird bereits nach dem dritten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-22. Nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 2 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 28 μm . Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 1 μm ab. Sie reduziert sich um circa 97 % und wird bereits nach dem zweiten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-22.

Der zunehmende Abfall der Glättungskurve, die geringere Anzahl an benötigten Druckdurchgängen $n_{S,full}$ bis zur vollständigen Füllung der Substrattopographie, sowie die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} mit zunehmender Nivellierungszeit t_N liegt begründet in dem Fließverhalten der Tinte. Die Fließlänge der Tinte ist abhängig von der Nivellierungszeit t_N , in der die Tinte Zeit hat in die Täler zu fließen. Durch eine geringe Nivellierungszeit t_N , legt die Tinte eine geringere Fließlänge zurück. Es gelangt weniger Tinte in die Täler. Da weniger Tinte in die Täler gelangt, wird das Tal der Substrattopographie nicht

vollständig gefüllt und das neue Minimum liegt unter dem maximal möglichen Füllstand. Dadurch nimmt der Abstand zwischen dem neu ausgebildeten Minimum im Tal und dem Maximum auf der Spitze weniger stark ab, wodurch die arithmetische Mittenrauheit S_a weniger abnimmt. Folglich werden mehr Druckdurchgänge zur vollständigen Glättung benötigt.

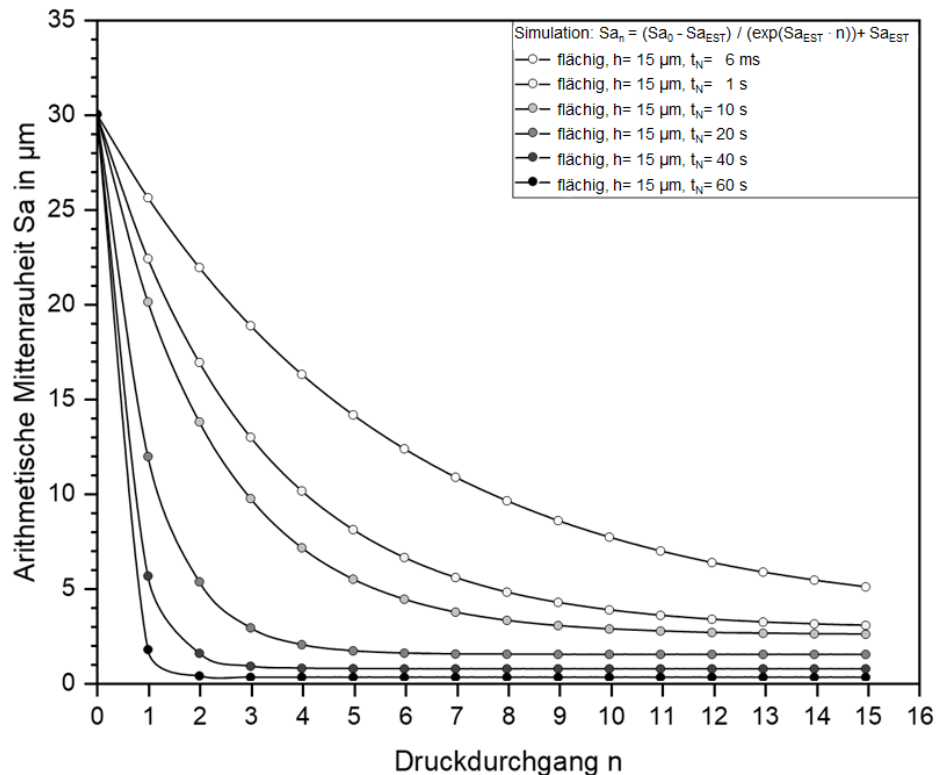


Abbildung 6-22: Simulation des Verlaufs der arithmetischen Mittenrauheit $S_{a,n}$ in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n mit zunehmender Nivellierungszeit t_N bei einer Schichtdicke h von $15 \mu\text{m}$ nach der Gleichung (5.2) des Modells der Tintentopographie (Linie).

Aus dem experimentellen Versuch der arithmetischen Mittenrauheit $S_{a,EST}$ mit zunehmender Nivellierungszeit t_N und den berechneten Ergebnissen basierend auf dem Modell der Tintentopographie (Gl. 5.2) und dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) für den Glättungsverlauf $S_{a,n}$, wird nach einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden, bei einer gedruckten Schichtdicke h von $15 \mu\text{m}$ und der Auflösung von $600 \times 600 \text{ dpi}$, der maximal mögliche Glättungsfortschritt $\Delta S_{a,n}$ erreicht.

6.2.3 Verifizierung der Verlaufssimulation

Die Verifizierung der theoretisch berechneten Glättungsverläufe nach dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) aus Kapitel 6.2.2 bei unterschiedlichen Nivellierungszeiten t_N erfolgt mittels der experimentellen Versuche NIV_1.1 bis NIV_1.4 und NIV_2.1 bis NIV_2.7, vgl. Kap. 4.4.3.3. Die am Druckschlitten integrierte UV Einheit ermöglicht eine minimale Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und ist abhängig von der Mechanik des Druckers. Eine längere

Nivellierungszeit t_N ist lediglich durch die separierte Vernetzung der Tinte nach dem Druckvorgang möglich. Zunächst druckt der Drucker die Tinte auf das Substrat. Die Tinte liegt dort im flüssigen Zustand vor. Nach Beendigung des gesamten Drucks wird die noch flüssige Tinte durch eine separierte UV-Einheit vernetzt. So benötigt der Drucker für ein gedrucktes Feld mit einer Größe von 5 cm² eine Druckzeit von insgesamt 20 Sekunden. Im Anschluss kann diese durch eine separierte UV-Einheit vernetzt werden. Aufgrund dieser Einschränkungen können die theoretisch berechneten Ergebnisse lediglich mit Nivellierungszeiten t_N von 6 Millisekunden und größer gleich 20 Sekunden überprüft werden.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen analog zum theoretisch berechneten Glättungsverlauf aus Abbildung 6-22, dass bei einer geringen Nivellierungszeit t_N die Steigung m nach den ersten Druckdurchgängen geringer, der Radius r im Übergang zur minimalen arithmetischen Mittenrauheit und die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} größer ist. Zudem wird die minimal erreichbare Rauheit erst nach einer größeren Anzahl an Druckdurchgängen $n_{s,full}$ erreicht, was darauf zurückzuführen ist, dass die Substratopographie erst zu einem späteren Zeitpunkt vollständig gefüllt ist. Insgesamt nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 mit zunehmenden Druckdurchgang n annähernd exponentiell ab, Abb. 6-23. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit fortschreitendem Druckdurchgang n abflacht.

Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 1,0 µm/µm auf 0,9 µm/µm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,1 µm/µm. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 1,0 µm/µm auf circa 0,15 µm/µm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 85 % und wird nach dem elften Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-23. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 1,0 µm/µm auf 0,68 µm/µm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,32 µm/µm. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 1,0 µm/µm auf circa 0,05 µm/µm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 95 % und wird nach dem vierten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-23. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei einer Nivellierungszeit t_N von 40 Sekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 1,0 µm/µm auf 0,66 µm/µm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt hier bei ΔSa_n bei 0,34 µm/µm. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 1,0 µm/µm auf circa 0,05 µm/µm ab. Die anfängliche arithmetische

Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 95 % und wird nach dem vierten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-23. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf $0,64 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei $0,36 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa $0,05 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 95 % und wird nach dem vierten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-23.

Der zunehmende Abfall der Glättungskurve, die geringere Anzahl an benötigten Druckdurchgängen $n_{s,full}$ bis zur vollständigen Füllung der Substrattopographie, sowie die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} mit zunehmender Nivellierungszeit t_N liegt, wie bereits erläutert, begründet in dem Fließverhalten der Tinte. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt pro Druckdurchgang n ab, sobald die homogene Schicht auf der Substrattopographie sich heterogen verteilt. Die Tinte von den Spitzen in Richtung der Täler geflossen ist. Diese Bewegung ist abhängig von der Fließgeschwindigkeit des Tintenfilms, die, unter gleichen Substratbedingungen, unter anderem von der Nivellierungszeit t_N abhängig ist. Der gleichmäßig aufgedruckte Tintenfilm liegt zunächst homogen verteilt auf der Substrattopographie vor. Auf der Spitze der Zahnstruktur liegt ebenso viel Tinte wie in den Tälern und auf den geneigten Zahnflanken. Durch die Hangabtriebskraft und die dazu entgegenwirkende Haftreibung fließt die Tinte in einer entsprechenden Geschwindigkeit, innerhalb der Nivellierungszeit, von der Spitze entlang der Zahnflanke in Richtung des Tales. Im Tal nimmt die Tinte den energetisch günstigsten Zustand ein, indem diese dort einen Meniskus ausbildet. Der Abstand zwischen dem neu entstandenen Minimum im Tal und dem neuen Maximum auf der Spitze wird geringer und die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt dementsprechend ab. Durch eine geringe Nivellierungszeit t_N verändert sich zwar die homogene Verteilung des Tintenfilms zugunsten des Tales, die Tinte kann jedoch nicht vollständig in das Tal fließen und wird bereits an den Zahnflanken vernetzt. Da sich somit nicht die gesamte Tinte in dem Tal ansammelt, liegt das neue Minimum im Tal unter dem maximal möglichen Füllstand. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt innerhalb dieses Druckdurchgangs weniger ab. Die Überlagerung der Glättungsverläufe nach einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden, t_N von 40 Sekunden und t_N von 60 Sekunden lässt darauf schließen, dass bereits nach 20 Sekunden die gesamte Tinte in die Täler geflossen ist, wodurch sich mit steigender Nivellierungszeit ein identischen Glättungsverlauf ergibt.

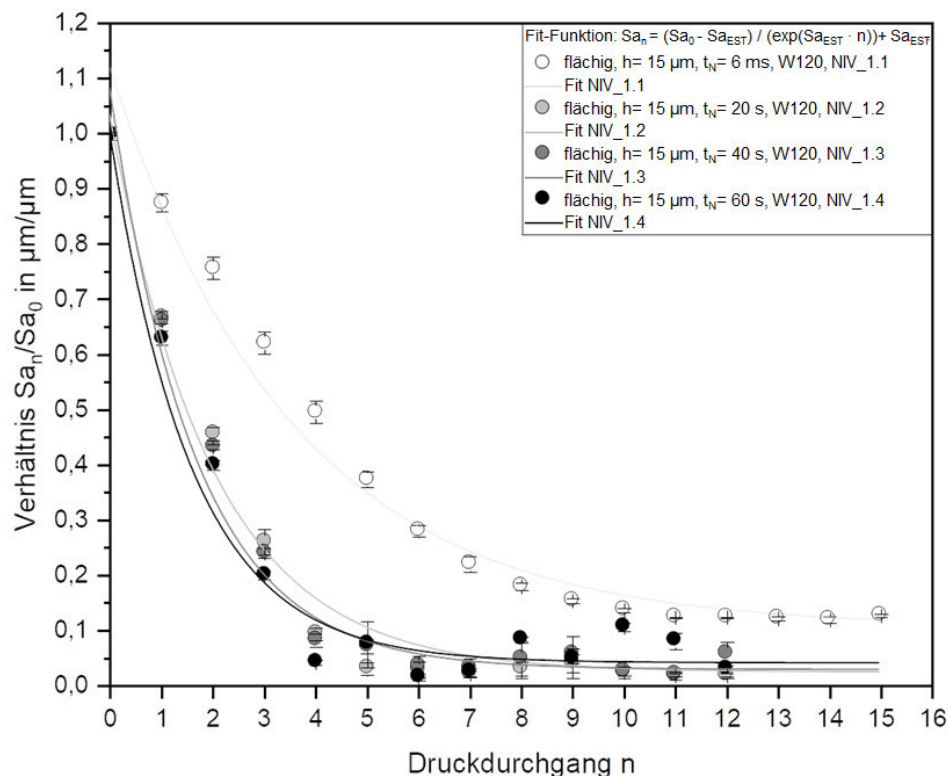


Abbildung 6-23: Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zu Sa_0 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n auf definierter Substratopographie W120 bei einem Schichtauftrag h von $15 \mu\text{m}$ unter dem Einfluss der Nivellierungszeit t_N und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6). (Versuche NIV_1.1 bis NIV_1.4).

Die Profilausschnitte aus der Konfokalmikroskopie zeigen die Veränderung der Form der Strukturelemente durch den Schichtauftrag.

Die unbedruckte Substratopographie W120 besitzt periodisch angeordnete Strukturelemente, die eine Zahnstruktur ausbilden. Diese Zahnstruktur besitzt eine relative Höhe von circa $100 \mu\text{m}$ und ist gezeichnet durch einen unruhigen Verlauf an den Zahnflanken, Abb. 6-24a. Nach dem ersten Druckdurchgang werden bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden die Spitze der Zahnstruktur aus der Substratopographie durch die Tintensicht abgerundet und der unruhige Verlauf an den Zahnflanken eingeebnet. Im Tal hat die angesammelte Tinte ebenfalls zu einer Rundung der Täler geführt. Nach dem fünften Druckdurchgang dominiert die Zahnstruktur der Substratopographie weiterhin den Profilquerschnitt mit dem Unterschied, dass die Tintentopographie zunehmend stärker in den Fokus tritt. Das Profil besitzt eine relative Höhe von $30 \mu\text{m}$. Die zuvor klar definierten Strukturelemente werden durch neu entstehende Strukturelemente aus den Tälern heraus ergänzt. Nach dem siebten Druckdurchgang dominiert die Zahnstruktur der Substratopographie noch immer den Profilquerschnitt. Die Tintentopographie tritt zunehmend stärker in den Fokus. Die relative

Höhe des Profils hat abgenommen und liegt bei 20 μm . Die zuvor klar definierten Strukturelemente werden durch neu entstehende Strukturelemente aus den Tälern heraus ergänzt. Nach zehn Druckdurchgängen dominiert die Tintentopographie über die Substrattopographie. Die Zahnstruktur der Substrattopographie ist nicht mehr eindeutig abgrenzbar, Abb. 6-24a. Nach dem ersten Druckdurchgang bleiben bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden die scharfkantigen Spitzen der Zahnstruktur aus der Substrattopographie trotz der Tintenschicht bestehen und im Tal der Zahnstruktur bildet sich durch die Tinte ein Meniskus aus. Der unruhige Verlauf an den Zahnflanken wurde größtenteils eingeebnet. Die relative Höhe liegt bei 80 μm , Abb. 6-24b. Die Zahnstruktur der Substrattopographie dominiert nach dem zweiten Druckdurchgang weiterhin den Profilquerschnitt. Die scharfkantigen Spitzen der Zahnstruktur aus der Substrattopographie bleibt trotz der Tintenschicht weiterhin bestehen und im Tal der Zahnstruktur prägt sich der Meniskus schwächer aus. Der unruhige Verlauf an den Zahnflanken wurde eingeebnet. Das Profil besitzt eine relative Höhe von 50 μm . Nach dem dritten Druckdurchgang verändert sich der Profilquerschnitt nicht signifikant. Der Meniskus im Tal nimmt weiter ab und die relative Höhe des Profils reduziert sich auf 30 μm . Nach fünf Druckdurchgängen dominiert die Tintentopographie über die Substrattopographie. Die Zahnstruktur der Substrattopographie ist nicht mehr eindeutig abgrenzbar, Abb. 6-24b. Der Vergleich des zehnten Druckdurchgangs bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und des fünften Druckdurchgangs bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden zeigt, dass die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie höher ist, wenn die Druckpunkte nicht ausreichend nivelliert und noch erkennbar sind.

Zusammenfassend zeigt sich, dass bei ausreichender Nivellierungszeit t_N die Tinte von den Spitzen herabfließt, sodass dort nur geringfügig Tinte stehen bleibt. Die eigentliche Tinte sammelt sich im lokalen Tal und füllt dadurch dieses auf. Die charakteristische Tintentopographie aus dem Druckprozess ist nicht mehr ausgeprägt vorhanden. Durch wiederholten Druckdurchgang n wird das lokale Tal mit definierten Schichtdicken h_{Tal} vollständig aufgefüllt. Ist die Nivellierungszeit t_N zu gering, bleibt Tinte auf den lokalen Spitzen stehen und die arithmetische Mittenrauheit Sa_n wird nicht ausreichend reduziert. Sobald die Tinte mit der UV-Strahlung in Kontakt tritt, startet ein Vernetzungsprozess, durch den die Tinte in dem vorliegenden Istzustand eingefroren wird. Es ist kein weiteres Fließen mehr möglich. Dies zeichnet sich an den abgerundeten Spitzen, Abb. 6-24a, ab.

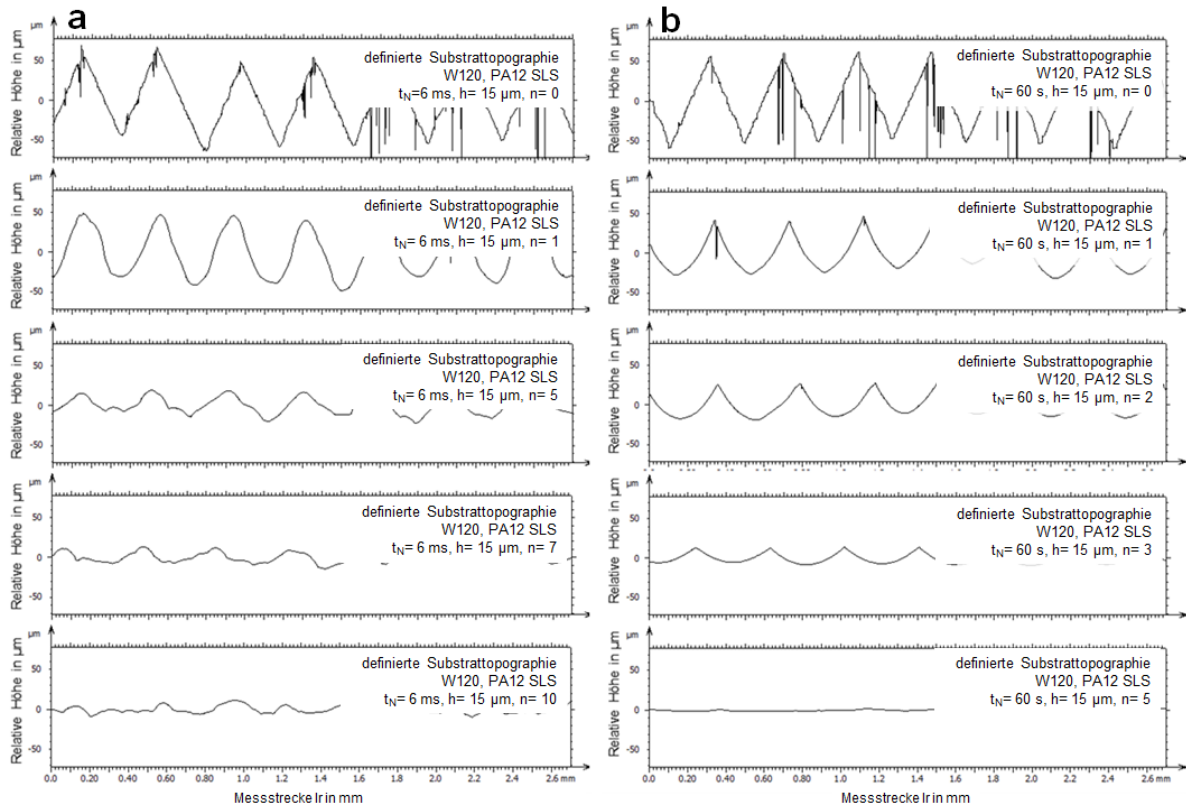


Abbildung 6-24: Verlauf der relativen Höhe des Profils in Abhängigkeit der Messstrecke der definierten Substrattopographie W120 bei einer mittleren Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ mit a) einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden nach einem Druckdurchgang n von 0, 1, 5, 7, und 10 und b) einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden nach einem Druckdurchgang n von 0, 1, 2, 3, und 5.

Der Glättungsverlauf Sa_n bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden, mit einem mittleren Schichtauftrag h von $15\text{ }\mu\text{m}$ lässt eine unterschiedliche Materialverteilung der Tinte auf der Substrattopographie vermuten. Diese Vermutung wird mit REM Aufnahmen näher analysiert.

Nach dem ersten Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der Tintenfilm nahezu homogen auf der definierten Substrattopographie W120. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur werden nahezu abgebildet. Lediglich die scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung an Tinte abgerundet. Bei genauerer Betrachtung ist auf den Spitzen eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern erkennbar, Abb. 6-25a. Die Tinte fließt nach dem ersten Druckdurchgang bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden vollständig in die Täler und bildet dort einen Meniskus aus. Die einzelnen Druckpunkte sind nicht mehr erkennbar, wodurch sich keine Tintentopographie abzeichnet. Die Spitzen von der Zahnstruktur der Substrattopographie sind klar erkennbar und trotz des Tintenfilms zeichnen sich diese ab, Abb. 6-25b. Nach dem ersten Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 40 Sekunden liegt der dünne Tintenfilm heterogen auf der definierten Substrattopographie W120. Die einzelnen Druckpunkte sind nicht mehr erkennbar, wodurch sich keine Tintentopographie abzeichnet. Die Spitzen von der

Zahnstruktur der Substrattopographie sind klar erkennbar und trotz des Tintenfilms zeichnen sich diese ebenfalls ab, Abb. 6-25c. Mit einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden ist nach dem ersten Druckdurchgang eine identisch heterogene Materialverteilung der Tinte auf der Substrattopographie erreicht. Es sind keine einzelnen Druckpunkte mehr erkennbar. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur werden in den Tälern von der Tinte abgerundet. Die Spitzen hingegen liegen in ihrer Ausgangsform vor, Abb. 6-25d.

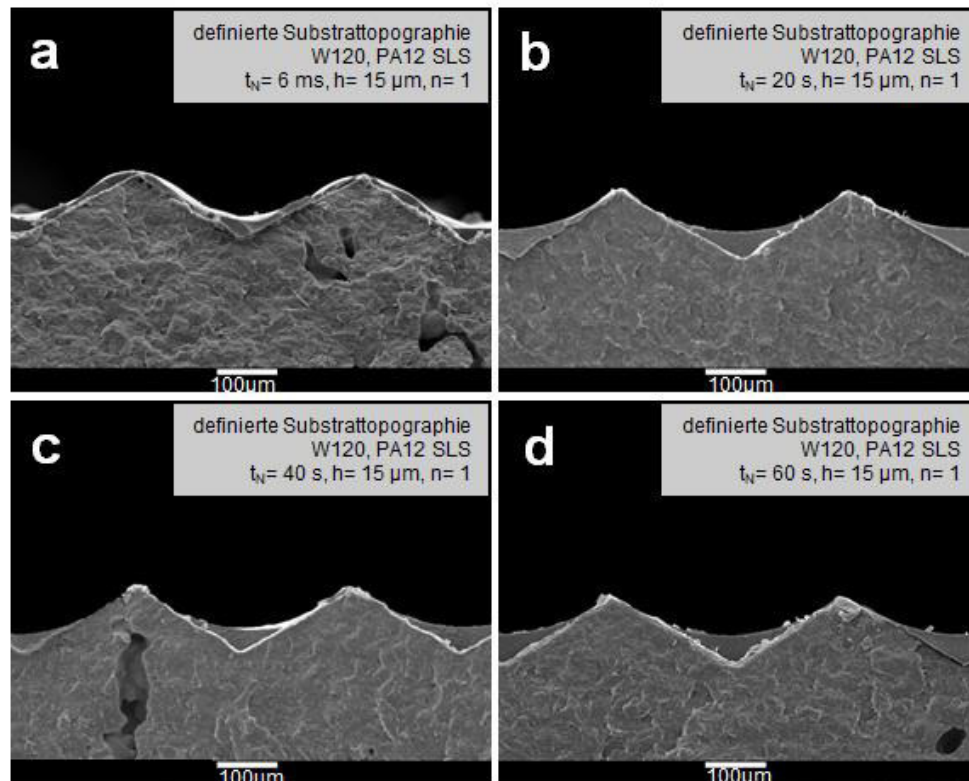


Abbildung 6-25: REM Aufnahmen der Topographie nach dem ersten Druckdurchgang bei unterschiedlichen Nivellierungszeit t_N bei einer Substrattopographie W120 und einem mittleren Schichtdicke h von 15 μm . a) Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden, b) Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden, c) Nivellierungszeit t_N von 40 Sekunden und d) Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden.

Die Verteilung der Tinte auf der Substrattopographie ist mit zunehmender Nivellierungszeit t_N , wie in den REM Aufnahmen ersichtlich, heterogen. In den Tälern befindet sich mehr Tinte als auf den vorhandenen Spitzen. Mittels der REM Aufnahmen kann stichprobenartig die Schichtdicke ermittelt werden. Dies bezieht sich auf eine festgelegte Position auf der Substrattopographie, die die jeweilige REM Aufnahme zeigt. Anhand der Materialverteilung, kann die Schichtdicke h_{Tal} im Tal (Gl. 5.13) berechnet und Rückschlüsse auf den Einfluss des freien Volumens $V_{\text{frei, MF}}$ getroffen werden.

Die homogene, mittlere Schichtdicke h auf dem Substrat liegt bei 15 μm . Der Materialauftrag der Schichtdicke h_{Tal} liegt aufgrund des Fließverhaltens der Tinte im Tal zunächst über diesem Wert. Nach dem ersten Druckdurchgang liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal mit circa 29 μm minimal unter der maximal möglichen Schichtdicke h_{Tal} von 30 μm . Die Glättung schreitet zügig

voran, Abb. 6-26. Nach dem zweiten Druckdurchgang liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal mit circa 23 μm minimal unter der maximal möglichen Schichtdicke h_{Tal} von 30 μm . Die Glättung schreitet weiterhin zügig voran, Abb. 6-26. Nach dem dritten Druckdurchgang verringert sich die Schichtdicke h_{Tal} im Tal auf circa 17 μm . Dies entspricht nahezu der homogenen Schichtdicke h . Die Glättung stagniert in diesem Druckdurchgang, Abb. 6-26. Nach dem vierten Druckdurchgang steigt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden wieder auf circa 23 μm . Die Substratopographie wird in diesem Druckdurchgang wieder verstärkt geglättet, da eine höhere Schichtdicke h_{Tal} im Tal zu finden ist, als an mittlerer Schichtdicke h aufgebracht wurde, Abb. 6-26. Nach dem fünften und sechsten Druckdurchgang bleibt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal auf gleich hohem Niveau. Diese liegt ebenfalls bei circa 23 μm , Abb. 6-26. Ab dem siebten Druckdurchgang liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal bei circa 16 μm und fluktuiert um diesen Wert bis zum elften Druckdurchgang. Die Materialverteilung ist innerhalb dieser Druckdurchgänge bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden auf der Substratopographie nahezu homogen. Dennoch findet eine Glättung statt, Abb. 6-26. Ab dem zwölften Druckdurchgang stagniert die Schichtdicke h_{Tal} im Tal. Diese liegt bei 15 μm . Ab diesem Druckdurchgang ist eine konstante, homogene Materialverteilung auf den Spitzen und in den Tälern pro Druckdurchgang erreicht. Diese Schichtdicke zeigt, dass ab dem zwölften Druckdurchgang keine Tinte mehr von den Spitzen in die Täler fließt. Die Topographie wird lediglich abgebildet. Die Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und die mittlere Schichtdicke h von 15 μm reicht mit zunehmendem Druckdurchgang n nicht mehr aus, die Tinte in die Fließbewegung zu bringen, sodass der Glättungsverlauf Sa_n ab diesem Druckdurchgang beendet ist, Abb. 6-26.

Demgegenüber steht die Materialverteilung bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden. Im ersten Druckdurchgang fließt bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden mehr Tinte in die Täler als die maximal mögliche Schichtdicke h_{Tal} im Tal von 30 μm zulässt. Die Schichtdicke h_{Tal} im Tal liegt bei circa 50 μm , Abb. 6-26. Nach dem zweiten Druckdurchgang liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal mit circa 27 μm minimal unter der maximal möglichen Schichtdicke h_{Tal} von 30 μm . Die Glättung schreitet weiterhin zügig voran, Abb. 6-26. Nach dem dritten Druckdurchgang bleibt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal auf gleich hohem Niveau. Diese liegt bei 27 μm , Abb. 6-26. Nach dem vierten Druckdurchgang fließt bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden nahezu die gesamte Tinte von den Spitzen in die Täler. Die Schichtdicke h_{Tal} im Tal liegt bei circa 25 μm , Abb. 6-26. Ab dem fünften Druckdurchgang liegt die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der Substratopographie W120 bei circa 16 μm . Die Materialverteilung ist auf der Substratopographie nahezu homogen, Abb. 6-26. In den fortlaufenden Druckdurchgängen fluktuiert die Schichtdicke h_{Tal} im Tal um 15 μm . Dies zeigt, dass eine homogene Materialverteilung auf der Substratopographie stattfindet und es deutet darauf hin, dass die maximale Glättung nach vier Druckdurchgängen erreicht wurde, Abb. 6-26.

Dass die maximal möglichen Schichtdicke h_{Tal} im Tal von $30\ \mu\text{m}$ in den ersten zwei Druckdurchgängen überstiegen wird, zeigt erneut die Grenzen des Modells der partiellen Materialverteilung (Gl. 5.13) auf. Das zweidimensionale Modell der Substrattopographie geht davon aus, dass das Tal lediglich von zwei Richtungen mit Tinte gespeist wird. Die reale dreidimensionale Substrattopographie wird jedoch von mehreren Seiten mit Tinte befüllt. Dementsprechend kann eine größere Schichtdicke h_{Tal} im Tal als die theoretisch mögliche Schichtdicke berechnet werden.

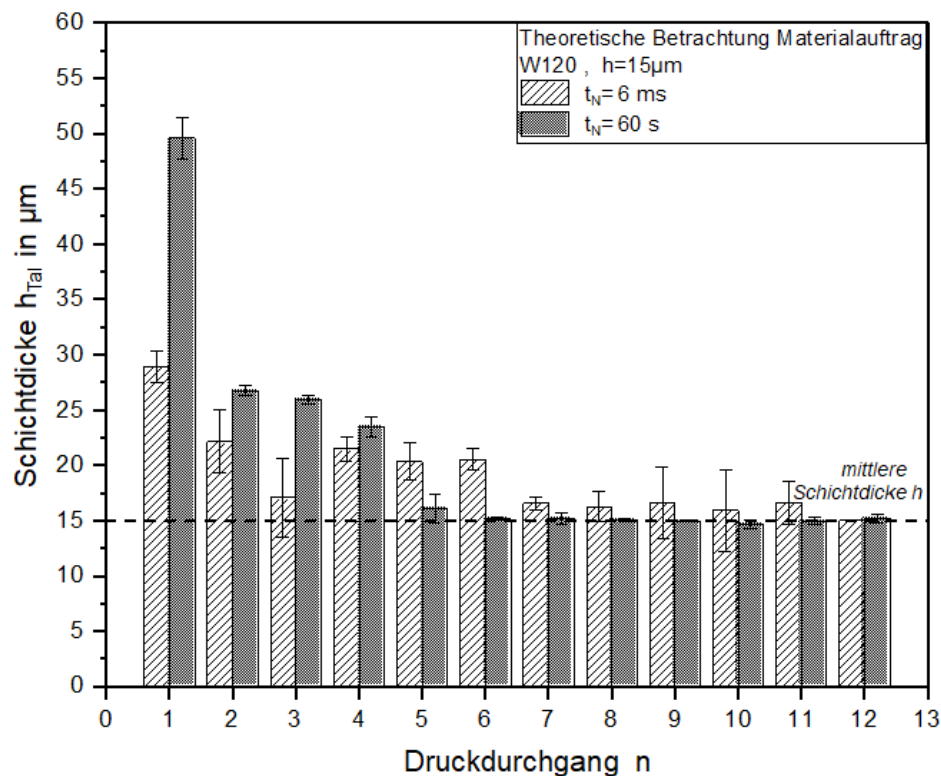


Abbildung 6-26: Theoretischer Schichtdicke h_{Tal} im Tal (Gl. 5.13) der definierten Substrattopographie W120 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n bei einer mittleren Schichtdicke h von $15\ \mu\text{m}$ unter Verwendung einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und 60 Sekunden. (Versuche NIV_1.1 und NIV_1.4).

Die Untersuchungen zeigen, dass eine längere Nivellierungszeit t_N die Schichtdicke h_{Tal} im Tal erhöht, da die Tinte mehr Zeit hat, um in die Täler zu fließen und diese aufzufüllen. Zudem bewirkt eine längere Nivellierungszeit t_N , dass die Anzahl der benötigten Druckdurchgänge $n_{s,full}$ zur vollständigen Füllung der Substrattopographie abnimmt.

6.2.4 Quintessenz

Die Nivellierungszeit t_N entscheidet die Position, an der die Tinte auf der Substrattopographie stehen bleibt. Ist diese ausreichend lange, kann das gesamte Material in die vorgesehenen Täler fließen. Allgemein kann der Glättungsverlauf Sa_n , der die Änderung der arithmetischen

Mittenrauheit Sa_n in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n repräsentiert, in drei Abschnitte untergliedert werden, Abb. 6-27. Der lineare Abfall der Kurve im ersten Abschnitt gibt indirekt Auskunft über den Füllstand der Tinte im Tal, da mit zunehmender Schichtdicke im Tal die Substrattopographie mehr aufgefüllt wird. Eine größere Schichtdicke im Tal reduziert die arithmetische Mittenrauheit Sa_n stärker. Diese Abnahme verändert die Steigung m im ersten Abschnitt. Der zweite Abschnitt gibt indirekt Auskunft über die Form der Strukturelemente der Substrattopographie. Die Strukturelemente besitzen unterschiedliche Neigungswinkel β_{tilt} . Verändert sich die Form der Strukturelemente, ändert sich der Neigungswinkel β_{tilt} , der wiederum das Fließverhalten der Tinte beeinflusst. Fließt zu wenig Tinte von den Spitzen in die Täler, reduziert sich die arithmetische Mittenrauheit Sa_n langsamer. Der dritte Abschnitt des Glättungsverlaufs Sa_n beschreibt die vorherrschende, dominierende Topographie, die sich bei einer konstanten arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} einstellt. Dieser Bereich stellt sich in der Regel ab dem Druckdurchgang $n_{s,full}$ ein, nach dem die Substrattopographie vollständig gefüllt bzw. überfüllt wurde, Abb. 6-27.

Mit abnehmender Nivellierungszeit t_N sinkt die Steigung m des nahezu linearen Bereichs im ersten Abschnitt. Vergrößert sich die Nivellierungszeit t_N , bekommt die Tinte mehr Zeit in die Täler zu gelangen. Mehr Tinte erreicht bei steigender Nivellierungszeit t_N die Täler und die arithmetische Mittenrauheit Sa_n wird stärker reduziert. Dieses zeichnet sich durch eine steigende Steigung m aus. Mit abnehmender Nivellierungszeit t_N vergrößert sich der Radius r des zweiten Abschnittes. Eine geringere Nivellierungszeit t_N verursacht ein geringeres Fließen der Tinte. Fließt die Tinte zu wenig, befindet sich neben der Tintenanhäufung im Tal auch Tinte auf den Spitzen. Dies hat zur Folge, dass die arithmetische Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n langsamer abnimmt, woraus ein vergrößerter Radius des Glättungsverlaufs Sa_n im zweiten Abschnitt resultiert. Ist die Substrattopographie nach einem Druckdurchgang $n_{s,full}$ vollständig gefüllt, dominiert die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie, die sich im dritten Abschnitt bei einem konstanten Wert einstellt. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie, wird mit abnehmender Nivellierungszeit t_N vergrößert. Die Druckpunkte bleiben verstärkt stehen.

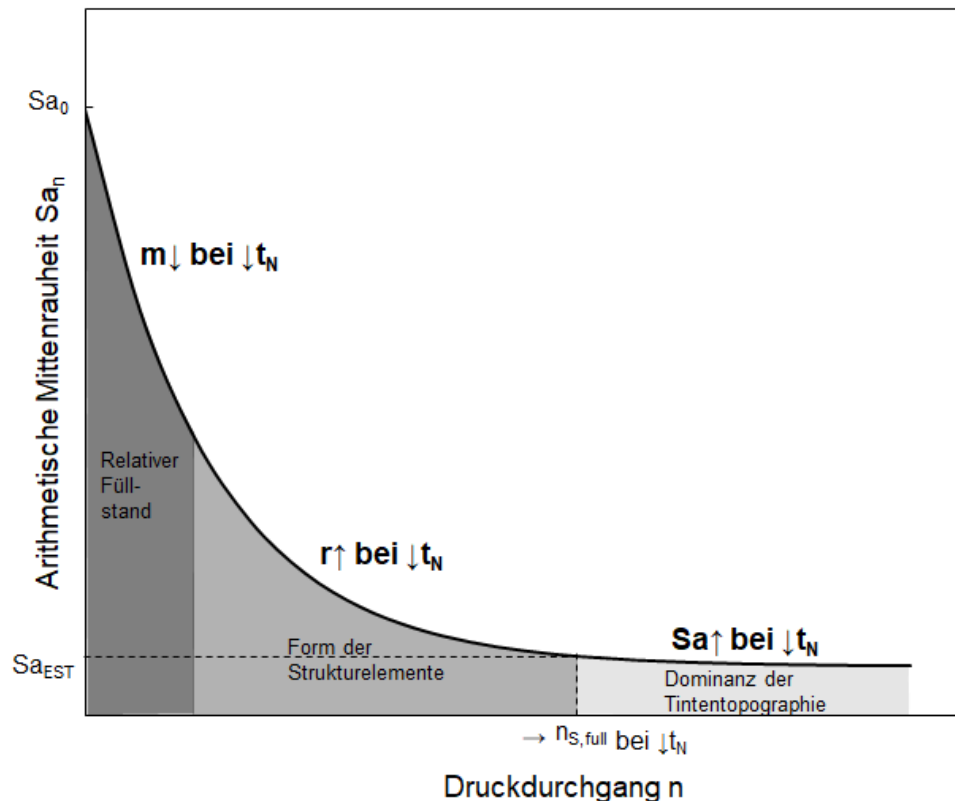


Abbildung 6-27: Schematische Darstellung des Einflusses der Nivellierungszeit t_N auf den Glättungsverlauf mit zunehmendem Druckdurchgang n . Die Steigung m des ersten Abschnitts, nimmt mit abnehmender Nivellierungszeit t_N ab. Der Radius des zweiten Abschnitts nimmt mit abnehmender Nivellierungszeit t_N zu. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie nimmt mit Nivellierungszeit t_N zu. Die Anzahl der benötigten Druckdurchgänge $n_{S,full}$ wird zudem größer.

6.3 Einfluss der Schichtdicke auf den Glättungsverlauf

Aus dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) geht hervor, dass die mittlere Schichtdicke h der aufgetragenen Tinte als eine ausschlaggebende Einflussgröße in den Glättungsverlauf Sa_n einwirkt. In der von De Gennes (Gennes et al., 2004) hergeleiteten Gleichung geht diese mit einer Potenz von drei in den Prozess ein. Der Einfluss dieser Größe wird in den folgenden Unterkapiteln anhand des Modells der Glättung (Gl. 5.6) zunächst mit der Gleichung 5.6 theoretisch berechnet. Im Anschluss das Ergebnis mit realen Werten verifiziert. Im Anschluss wird der Glättungsverlauf Sa_n der definierten Substrattopographie W120 in Abhängigkeit der aufgetragenen, mittleren Schichtdicke h experimentell analysiert.

6.3.1 Verlaufssimulation der maximal möglichen Schichtdicke

Das Modell der Glättung (Gl. 5.6) demonstriert die Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n . Die maximal mögliche Glättung ist begrenzt durch die Tintentopographie, die die arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} besitzt. Die Tintentopographie ist in der ganzheitlichen Betrachtung des Modells der Glättung (Gl. 5.6) ein dominierender Einflussfaktor, der abhängig von der Druckpunktgröße und -positionierung ist.

Die Druckpunktgröße und -positionierung kann sich bei unterschiedlichen Schichtdicken, aufgrund des Schwarzanteils der Grafik, unterscheiden und folglich die Tintentopographie verändern. Die Ermittlung der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} bei unterschiedlich hoher Schichtdicke h unter Verwendung der Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden erfolgt mittels den experimentellen Untersuchungen DIC_1.1 bis DIC_1.3.

Bei einer mittleren Schichtdicke h von 10 μm liegt die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographien bei $3,62 \pm 0,11 \mu\text{m}$, Abb. 6-28. Steigt die mittlere Schichtdicke h auf 12 μm , erzeugt dieses eine arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie von $3,62 \pm 0,06 \mu\text{m}$. Die mit den Druckeinstellungen maximal erreichbare, mittlere Schichtdicke h wird bei 15 μm erreicht. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie liegt hier bei $3,66 \pm 0,04 \mu\text{m}$.

Es zeigt sich, dass die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie unabhängig von der aufgedruckten mittleren Schichtdicke h bei einem Wert von circa 3,63 μm einpendelt, Abb. 6-28.

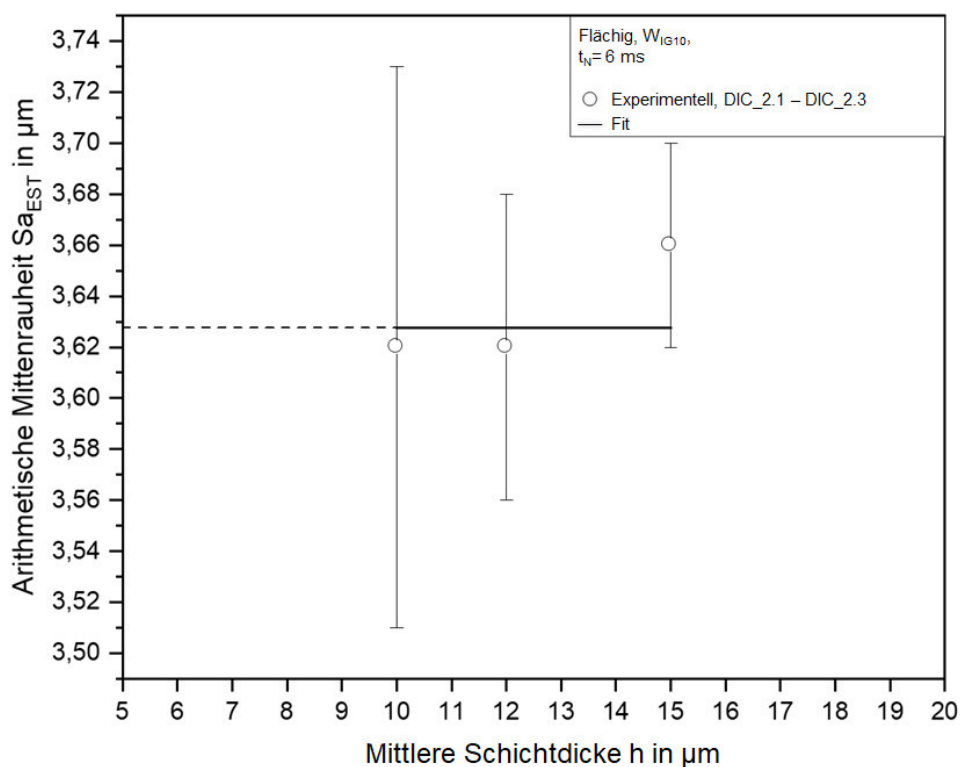


Abbildung 6-28: Simulation der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie in Abhängigkeit der Schichtdicke h bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden nach der Gleichung (5.2) des Modells der Tintentopographie (Linie) und Verifizierung dieses Verlaufs mit den experimentellen Ergebnissen für die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} (Punkte) nach Versuche DIC_2.1 bis DIC_2.3.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie wird bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden entsprechend dem Modell der Tintentopographie (Gl. 5.2) reduziert.

Die Anzahl der Druckdurchgänge n , die benötigt werden, um die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} bei unterschiedlichen Schichtdicken h zu erreichen, wird mittels des Modells der Glättung (Gl. 5.6) untersucht. Das Modell der Glättung beinhaltet die Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n . Mittels diesem Modell wird der Einfluss der Schichtdicke h auf den Glättungsverlauf Sa_n bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden mit zunehmendem Druckdurchgang n simuliert und analysiert.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt mit zunehmenden Druckdurchgang n exponentiell ab, Abb. 6-29. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit fortschreitendem Druckdurchgang n abflacht. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n bleibt bei einer mittleren Schichtdicke h von 1 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs. Folglich liegt kein Glättungsfortschritt ΔSa_n vor. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n bleibt die arithmetische Mittenrauheit bei 30 μm . Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_n wird nicht reduziert, da die Masse der Tinte für die Fließbewegung nicht ausreicht und somit die Tinte auf der Substratopographie homogen liegen bleibt, Abb. 6-29. Liegt die mittlere Schichtdicke h der Tinte bei 5 μm , reduziert sich die arithmetische Mittenrauheit Sa_n während dem Glättungsverlauf Sa_n von 30 μm auf circa 29 μm . Dies entspricht einer Abnahme von 3 % der anfänglichen arithmetischen Mittenrauheit Sa_0 . Nach dem 15. Druckdurchgang ist bei einer mittleren Schichtdicke h von 5 μm noch keine konstante arithmetische Mittenrauheit Sa_n erreicht. Der Glättungsverlauf Sa_n verläuft nahezu linear im gesamten Bereich, Abb. 6-29. Steigt die mittlere Schichtdicke h auf 7 μm , nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 27 μm ab. Dies entspricht einem Glättungsfortschritt ΔSa_n im ersten Druckdurchgang von 3 μm . Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 nimmt während dem gesamten Glättungsverlauf Sa_n innerhalb der 15 Druckdurchgänge exponentiell von 30 μm auf 8 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich bis zu diesem Druckdurchgang um circa 73 %. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 8 μm ist nach dem 15. Druckdurchgang noch kein konstanter Wert, wodurch von einer weiteren Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit bei zunehmendem Druckdurchgang ausgegangen werden kann, Abb. 6-29. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von 9 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 24 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 6 μm . Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetischen Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 1 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich nach dem 15. Druckdurchgang um circa 97 %. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 1 μm ist nach dem 15. Druckdurchgang noch kein konstanter Wert, wodurch ebenfalls von einer weiteren Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang

n ausgegangen werden kann, Abb. 6-29. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von 10 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 23 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 7 μm . Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 1 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich nach dem 15. Druckdurchgang um circa 97 %. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 1 μm ist nach dem 15. Druckdurchgang noch kein konstanter Wert, wodurch ebenfalls von einer weiteren Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit mit zunehmendem Druckdurchgang ausgegangen werden kann, Abb. 6-29. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von 12 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 18 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 12 μm . Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 1 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 97 % und wird nach dem zehnten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-29. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 12 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 18 μm . Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 1 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 97 % und wird nach dem fünften Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-29. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von 20 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf circa 3 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 28 μm . Im gesamten Glättungsverlauf nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 1 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 97 % und wird nach dem zweiten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-29. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von 25 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 1 μm ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 29 μm . Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 1 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 97 % und wird bereits nach dem ersten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-29. Der Glättungsverlauf Sa_n bei einer Schichtdicke h von 100 μm ist identisch zu dem Glättungsverlauf Sa_n bei einer Schichtdicke h von 25 μm , Abb. 6-29.

Der zunehmende Abfall der Glättungskurve, die geringere Anzahl an benötigten Druckdurchgängen $n_{S,full}$ bis zur vollständigen Füllung der Substrattopographie, sowie die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} mit zunehmender Schichtdicke h liegt begründet in dem Fließverhalten der Tinte bei unterschiedlichem Tintenvolumen. Durch eine geringe Schichtdicke h , liegt eine geringe Masse vor. Durch eine geringe Masse wird die Hangabtriebskraft reduziert. Zusätzlich wirkt eine kompensierende Haftreibung. Die Tinte wird

im Fließen eingeschränkt. Der zunächst gleichmäßig aufgedruckte Tintenfilm liegt homogen verteilt auf der Substratopographie vor. Auf der Spitze der Zahnstruktur liegt ebenso viel Tinte wie in den Tälern und auf den Zahnflanken. Durch die geringe Hangabtriebskraft und die kompensierende Haftreibung, fließt die Tinte innerhalb der vorgegebenen Nivellierungszeit, im Vergleich zu einer höheren Hangabtriebskraft und der wirkenden Haftreibung, langsamer von der Spitze entlang der Zahnflanke in Richtung des Tales. Durch eine zu geringe Schichtdicke h kann sich die homogene Verteilung des Tintenfilms minimal zugunsten des Tales wenden, die Tinte kann jedoch den energetisch günstigsten Zustand im Tal nicht einnehmen und wird bereits an den Zahnflanken vernetzt.

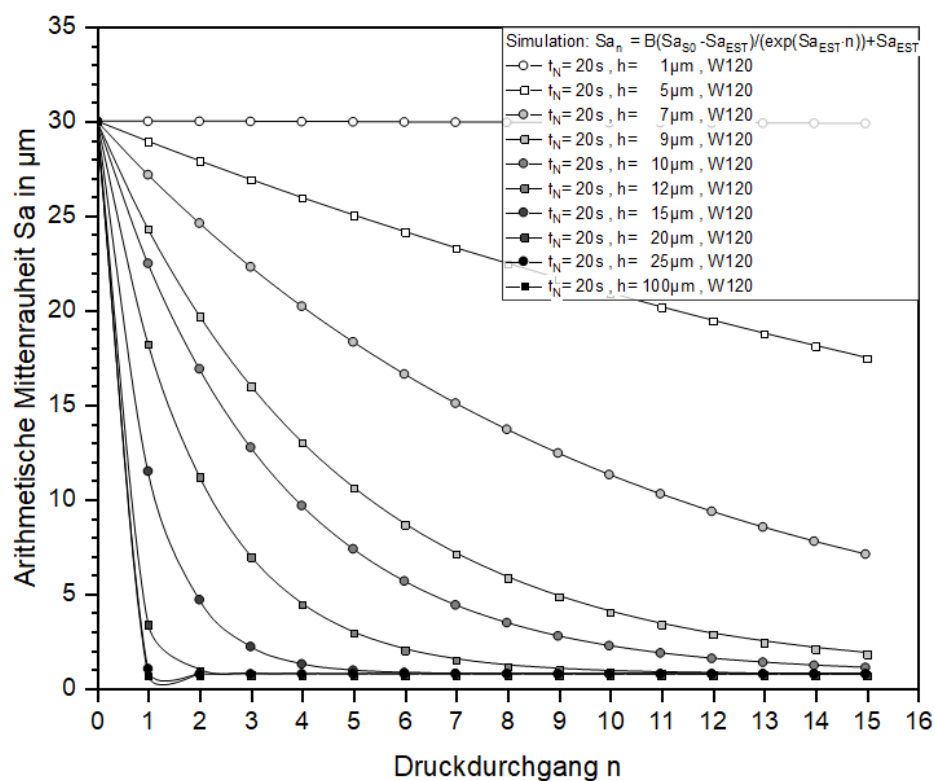


Abbildung 6-29: Theoretische Berechnung des Glättungsverlaufs Sa_n der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n mit zunehmender mittlerer Schichtdicke h bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden nach der Gleichung (5.2) des Modells der Tintentopographie (Linie).

Die theoretische Berechnung auf Basis des Modells der Glättung (Gl. 5.6) bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden zeigt, dass sich die mittlere Schichtdicke h von 15 μm von einer größeren Schichtdicke h nicht signifikant unterscheidet. Durch die mittlere Schichtdicke h von 15 μm kann die arithmetische Mittenrauheit Sa_n der Substratopographie gezielt eingestellt werden.

Die Verifizierung der theoretisch berechneten Glättungsverläufe nach dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) bei unterschiedlichen Schichtdicken h in Abhängigkeit der Druckdurchgänge n erfolgt mittels den experimentellen Untersuchungen DIC_2.1 bis DIC_2.3, siehe Kapitel 4.4.3.4.

6.3.2 Verifizierung der Verlaufssimulation

Die Verifizierung der theoretisch berechneten Glättungsverläufe nach dem Modell der Glättung (Gl. 5.6) bei unterschiedlichen mittleren Schichtdicken h in Abhängigkeit der Druckdurchgänge n erfolgt mittels des Abgleichs der Simulationsergebnisse aus Kapitel 6.3.1 mit der experimentellen Untersuchung NIV_1.2 aus Kapitel 4.4.3.3. Als Basis gilt eine Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden und eine mittlere Schichtdicke h von 15 μm auf der definierten Substratopographie W120.

Die experimentellen Ergebnisse des Glättungsverlaufs Sa_n in Abhängigkeit der Nivellierungszeit t_N bei einer aufgetragenen, mittleren Schichtdicke h von 15 μm haben gezeigt, dass das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,68 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ abnimmt. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,32 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$, Tab. 6-2. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa 0,05 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 95 % und wird nach dem vierten Druckdurchgang erreicht. Die Simulationsergebnisse des Glättungsverlaufs Sa_n aus Kapitel 6.3.1 in Abhängigkeit der aufgetragenen, mittleren Schichtdicke h bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden haben gezeigt, dass die arithmetische Mittenrauheit Sa_n bei einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 30 μm auf 12 μm abnimmt. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 18 μm und entspricht einem auf die Ausgangsrauheit Sa_0 normierten Glättungsfortschritt ΔSa_n von 0,6 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_n von 30 μm auf circa 1 μm ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 97 % und wird nach dem fünften Druckdurchgang erreicht, Tab. 6-2.

Der Abgleich des experimentellen Versuchs NIV_1.2 mit den Simulationsergebnissen aus dem Modell der Glättung (Gl. 5.2) aus Kapitel 6.3.1 zeigt, dass die experimentelle arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} mit 0,8 μm nur geringfügig unter der theoretisch berechneten arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} von 1,0 μm liegt. Tab. 6-2. Der benötigte Druckdurchgang $n_{S,full}$, der bei beiden bis zum Erreichen der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} benötigt wird, stimmt nahezu überein. So wird die experimentelle arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} nach vier Druckdurchgängen erreicht. Die theoretisch berechnete arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} stellt sich nach fünf Druckdurchgängen ein. Die experimentell mögliche, maximale Glättung der definierten Substratopographie W120 liegt bei 95 %. Demgegenüber steht die berechnete, maximale Glättung der definierten Substratopographie W120, die bei 97 % liegt. Lediglich der

Glättungsfortschritt ΔSa_n nach dem ersten Druckdurchgang unterscheidet sich von dem experimentellen zum berechneten Wert. Der simulativ bestimmte Glättungsfortschritt ΔSa_n liegt nach dem ersten Druckdurchgang bei 60 %. Der experimentelle Glättungsfortschritt ΔSa_n liegt jedoch bei lediglich 32 % nach dem ersten Druckdurchgang, Tab. 6-2.

Die Abweichung des theoretisch berechneten zum experimentellen Wert liegt darin, dass der berechnete Wert von einer idealisierten Substrattopographie ausgeht. Die Flanken der einzelnen Strukturelemente sind eben. Die reale Substrattopographie besitzt jedoch durch die Nachbearbeitung einen unruhigen Flankenverlauf. Diese Unruhe hemmt das Fließen der Tinte und der Glättungsfortschritt ΔSa_n nimmt ab.

Tabelle 6-2: Verifizierung des theoretisch berechneten Glättungsverlaufs nach dem Modell der Glättung (Gl. 5.2) bei einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm auf der definierten Substrattopographie W120. Die experimentellen Werte werden aus dem Versuch NIV_1.2 ermittelt und mit den aus der Gleichung 5.2 theoretisch berechneten Werten gegenübergestellt.

NIV_1.2/ SIMULATION	Glättungsfortschritt ΔSa_n nach 1. Druckdurchgang in %	Minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} in μm	Druckdurchgang $n_{s,full}$	Maximale Glättung in %
Experimentell nach NIV_1.2	32	0,8	4	95
Theoretisch berechnet nach Gl. 5.2	60	1,0	5	97

Die Verifizierung der Simulationsergebnisse auf Basis des Modells der Glättung (Gl. 5.6) bei einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm zeigt, dass die theoretisch berechneten Ergebnisse mit den experimentell bestimmten Werten übereinstimmen. Lediglich der Einfluss eines unruhigen Flankenverlaufs der Strukturelemente können den experimentellen Glättungsverlauf Sa_n von dem idealisierten, simulierten Glättungsverlauf Sa_n auf Basis des Modells der Glättung (Gl. 5.2) abweichen lassen. Daraus folgt, dass mit dem Modell der Glättung (Gl. 5.2) eine Vorhersage des idealisierten Glättungsverlaufs Sa_n erfolgen kann.

6.3.3 Glättungsverlauf unterschiedlicher mittlerer Schichtdicken

Der Glättungsverlauf Sa_n bei unterschiedlichen mittleren Schichtdicken h in Abhängigkeit der Druckdurchgänge n erfolgt mittels der experimentellen Versuche DIC_2.1 bis DIC_2.3, siehe Kapitel 4.4.3.4.

Die experimentellen Ergebnisse zeigen analog zum theoretisch berechneten Glättungsverlauf aus Abbildung 6-30, dass bei einer geringen mittleren Schichtdicke h die Steigung m nach den ersten Druckdurchgängen geringer, der Radius r im Übergang und die minimal erreichbare Rauheit größer ist. Zudem wird die minimal erreichbare Rauheit erst nach einer größeren Anzahl an Druckdurchgängen n erreicht. Insgesamt nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 mit zunehmenden Druckdurchgang n annähernd

exponentiell ab, Abb. 6-30. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit fortschreitendem Druckdurchgang n abflacht. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei einer Schichtdicke h von 15 μm und unter Verwendung der Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,88 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,12 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa 0,15 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 85 % und wird nach dem elften Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-30. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt mit einer Schichtdicke h von 12 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,95 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,05 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa 0,15 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 85 % und wird nach dem vierten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-30. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt mit einer Schichtdicke h von 10 μm innerhalb des ersten Druckdurchgangs von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,99 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,01 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa 0,2 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich innerhalb von 35. Druckdurchgängen um circa 95 %. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 0,15 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ist nach dem 35. Druckdurchgang noch nicht erreicht, wodurch von einer weiteren Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit mit zunehmendem Druckdurchgang ausgegangen werden kann, Abb. 6-30.

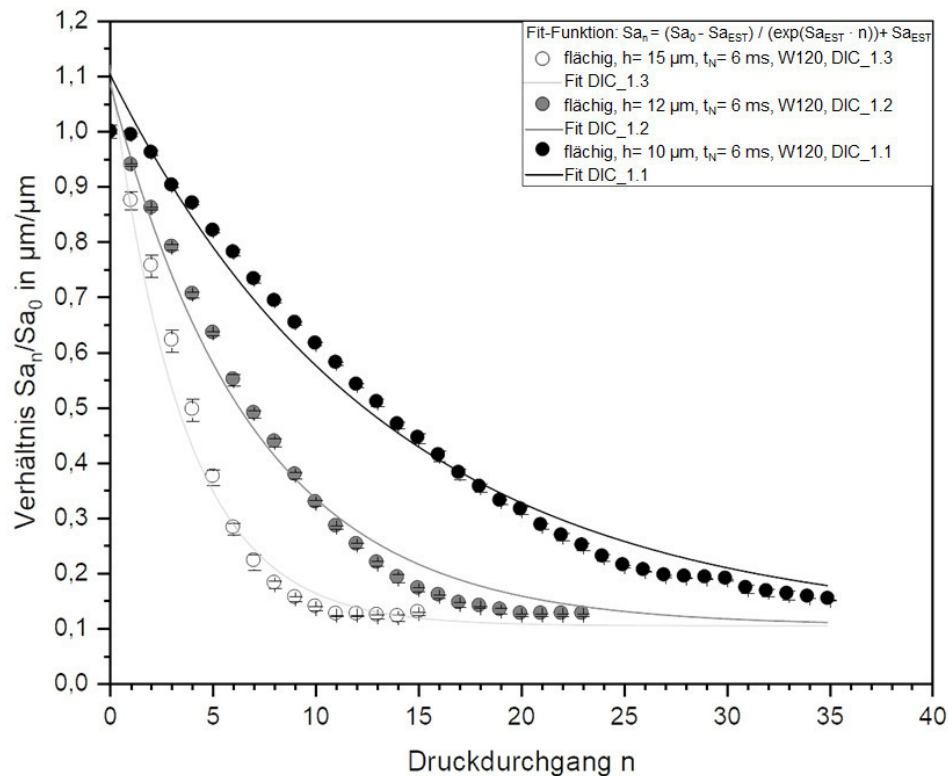


Abbildung 6-30: Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zu Sa_0 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n auf definierter Substratopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden unter dem Einfluss der variablen Schichtdicke h und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6). (Versuche DIC_1.1 – DIC_1.3)

Der verlangsamte Glättungsverlauf Sa_n auf der definierten Substratopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden mit abnehmender Schichtdicke h in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n bestätigt den Einfluss der Schichtdicke auf das Fließverhalten der Tinte. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n steigt mit zunehmender Schichtdicke h .

Der zunehmende Abfall der Glättungskurve, die geringere Anzahl an benötigten Druckdurchgängen $n_{s,full}$ bis zur vollständigen Füllung der Substratopographie, sowie die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} mit zunehmender Schichtdicke h liegt, wie bereits erwähnt, begründet in dem Fließverhalten der Tinte bei unterschiedlichem Tintenvolumen. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt pro Druckdurchgang n ab, sobald sich die homogene Schicht auf der Substratopographie heterogen verteilt. Die Tinte von den Spitzen in Richtung der Täler geflossen ist. Diese Bewegung resultiert primär aus der Hangabtriebskraft, die mit der Masse der Tinte zusammenhängt. Im Allgemeinen liegt der gleichmäßig aufgedruckte Tintenfilm zunächst homogen verteilt auf der Substratopographie vor. Durch die Hangabtriebskraft und die dazu entgegenwirkende Haftreibung fließt die Tinte

in einer entsprechenden Geschwindigkeit, innerhalb der vorgegebenen Nivellierungszeit, von der Spitze entlang der Zahnflanke in Richtung des Tales. Im Tal nimmt die Tinte den energetisch günstigsten Zustand ein, indem diese dort einen Meniskus ausbildet. Der Abstand zwischen dem neu entstandenen Minimum im Tal und dem neuen Maximum auf der Spitze wird geringer und die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt dementsprechend ab. Eine größere Schichtdicke h bedeutet, dass eine größere Masse der Tinte an einer Position auf der Substratopographie vorliegt. Die Hangabtriebskraft, die sich aus der Masse, der Erdbeschleunigung und dem Neigungswinkel berechnet, steigt, während die Haftreibung gleichbleibt. Folglich fließt die Tinte schneller und legt innerhalb der festgelegten Nivellierungszeit einen größeren Fließweg zurück. Da sich somit mehr Tinte in dem Tal ansammelt, liegt das neue Minimum im Tal höher als es bei einer geringeren Schichtdicke h der Fall wäre. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt innerhalb dieses Druckdurchgangs stärker ab, wodurch der Glättungsfortschritt ΔSa_n sinkt.

Die Darstellung des Glättungsverlaufs Sa_n mit unterschiedlichen mittleren Schichtdicken h in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n vernachlässigt, dass ein geringeres Tintenvolumen V_{Tinte} das freie Volumen der Substratopographie langsamer auffüllt und somit mehr Druckdurchgänge n benötigt werden. Um eine Vergleichbarkeit des tatsächlichen Materialauftrags, unabhängig des aufgetragenen Tintenvolumens pro Druckdurchgang n , zu bekommen, wird zusätzlich die Darstellung des Glättungsverlaufs Sa_n mit unterschiedlichen mittleren Schichtdicken h in Abhängigkeit der gesamten mittleren Schichtdicke h_{ges} , die nach einer definierten Anzahl an Druckdurchgängen n bereits aufgebracht wurde, gewählt.

Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt mit zunehmender Gesamtschichtdicke h_{ges} auf dem Substrat exponentiell ab, Abb. 6-31. Der exponentielle Glättungsverlauf Sa_n zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit fortschreitender, aufgetragener Gesamtschichtdicke h_{ges} abflacht. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm und unter Verwendung der Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden innerhalb der ersten 100 μm der gesamten Schichtdicke h_{ges} von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,22 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n innerhalb dieser gesamten Schichtdicke h_{ges} auf dem Substrat bei 0,78 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa 0,15 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 85 % und wird nach einer gesamten Schichtdicke h_{ges} von circa 160 μm erreicht, Abb. 6-31. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von 12 μm und unter Verwendung der Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden innerhalb der ersten 100 μm der gesamten Schichtdicke h_{ges} von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,38 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n

innerhalb dieser gesamten Schichtdicke h_{ges} bei $0,62 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa $0,15 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 85 % und wird nach einer gesamten Schichtdicke h_{ges} von circa $230 \mu\text{m}$ erreicht, Abb. 6-31. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 nimmt bei einer mittleren Schichtdicke h von $10 \mu\text{m}$ und unter Verwendung der Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden innerhalb der ersten $100 \mu\text{m}$ der gesamten Schichtdicke h_{ges} von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf $0,59 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n innerhalb dieser gesamten Schichtdicke h_{ges} bei $0,41 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur Ausgangsrauheit Sa_0 von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa $0,15 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die anfängliche arithmetische Mittenrauheit Sa_0 reduziert sich um circa 85 % und wird nach einer gesamten Schichtdicke h_{ges} von mehr als $350 \mu\text{m}$ erreicht, Abb. 6-31.

Die verlangsamte Glättung aus dem Glättungsverlauf Sa_n auf der definierten Substratopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden mit abnehmender Schichtdicke h in Abhängigkeit der gesamten Schichtdicke h_{ges} bestätigt den Einfluss der Schichtdicke auf das Fließverhalten der Tinte unabhängig von der Anzahl der Druckdurchgänge n . Der zunehmende Abfall der Glättungskurve, die geringere Anzahl an benötigten Druckdurchgängen $n_{s,full}$ bis zur vollständigen Füllung der Substratopographie, sowie die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} mit zunehmender Schichtdicke h bestätigt die Annahme, dass dieser begründet in dem Fließverhalten der Tinte bei unterschiedlichem Tintenvolumen liegt. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt pro Druckdurchgang n ab, sobald sich die homogene Schicht auf der Substratopographie heterogen verteilt. Wie bereits beschrieben, resultiert die Bewegung der Tinte primär aus der Hangabtriebskraft und der dazu entgegenwirkenden Haftreibung, die bei größerer Schichtdicke h größer ist. Dadurch fließt die Tinte in einer entsprechenden Geschwindigkeit, innerhalb der Nivellierungszeit, von der Spitze entlang der Zahnflanke in Richtung des Tales schneller. Es wird eine größere Fließlänge von der Tinte zurückgelegt und es sammelt sich mehr Tinte im Tal. Der Abstand zwischen dem neu entstandenen Minimum im Tal und dem neuen Maximum auf der Spitze wird geringer und die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt dementsprechend ab. Dass die Fließlänge der Tinte bei einer geringeren mittleren Schichtdicke h kürzer ist, wird aus der gesamten Schichtdicke h_{ges} ersichtlich, die zum Erreichen der minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_n benötigt wird. Es wird mehr Schichtdicke h_{ges} aufgebracht, bis die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_n , bei einer geringeren mittleren Schichtdicke h pro Druckdurchgang, erreicht wird. Durch die geringe Schichtdicke besitzt die Tinte eine geringere Masse. Folglich legt die Tinte einen geringeren Weg innerhalb der definierten Nivellierungszeit zurück und wird an den Flanken vernetzt.

Dadurch wird pro Druckdurchgang weniger Tinte in den Tälern gesammelt, die die arithmetische Mittenrauheit Sa_n reduziert und der Glättungsfortschritt ΔSa_n erhöht.

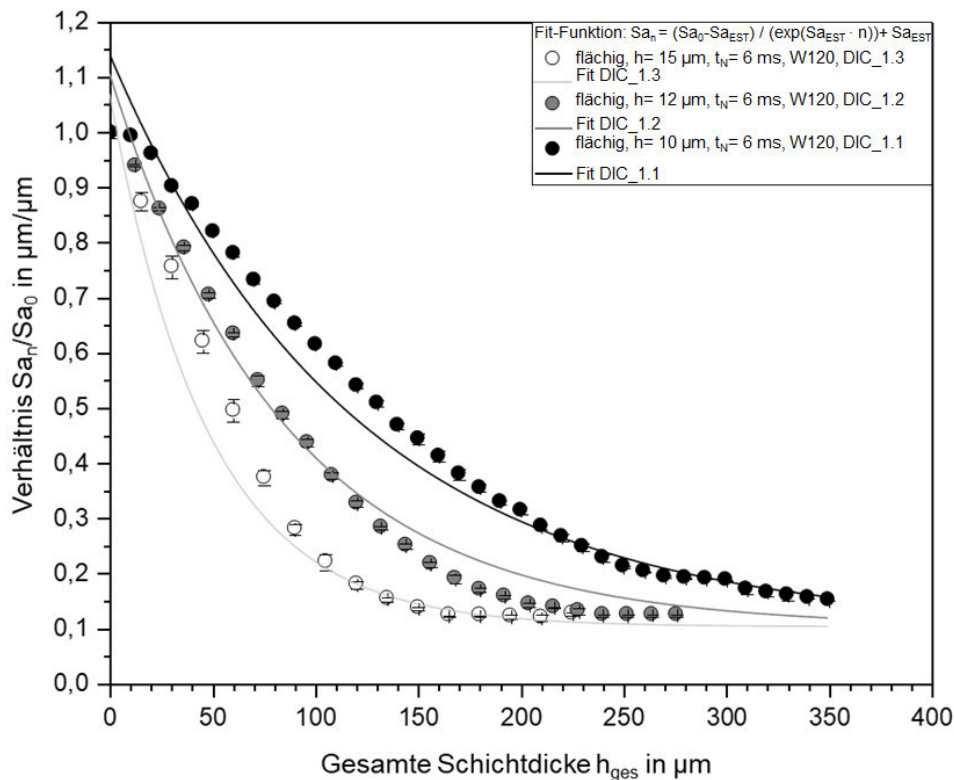


Abbildung 6-31: Verhältnis der arithmetische Mittenrauheit Sa_n zu Sa_0 in Abhängigkeit des gesamten Materialauftrags h_{ges} auf definierter Substratopographie W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden unter dem Einfluss der variablen Schichtdicke h und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6). (Versuche DIC_1.1 – DIC_1.3)

Der Glättungsverlauf Sa_n bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden auf der definierten Substratopographie W120 bei variierender mittlerer Schichtdicke h lässt eine unterschiedliche Materialverteilung der Tinte auf der Substratopographie vermuten. Diese Vermutung wird mit REM Aufnahmen untersucht.

Nach dem ersten Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der dünne Tintenfilm mit einer mittleren Schichtdicke h von $15 \mu\text{m}$ nahezu homogen auf der definierten Substratopographie W120, Abb. 6-32a. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur werden nahezu abgebildet. Lediglich die scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung an Tinte abgerundet. Bei genauerer Betrachtung ist auf den Spitzen eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern erkennbar. In den Tälern liegt die Schichtdicke h_{Tal} verstärkt vor, Abb. 6-32a. Nach dem ersten Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der Tintenfilm mit einer

mittleren Schichtdicke h von 12 μm ebenfalls nahezu homogen auf der definierten Substrattopographie W120. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur werden ebenfalls abgebildet. Lediglich die scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung an Tinte abgerundet. Bei genauerer Betrachtung ist auf den Spitzen eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern erkennbar. In den Tälern liegt die Schichtdicke h_{Tal} verstärkt vor, Abb. 6-32d. Das gleiche Bild ergibt sich bei einer mittleren Schichtdicke h von 10 μm , Abb. 6-32g. Nach dem ersten Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der Tintenfilm mit einer mittleren Schichtdicke h von 10 μm ebenfalls nahezu homogen auf der definierten Substrattopographie W120. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur werden ebenfalls abgebildet. Lediglich die scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung an Tinte abgerundet. Bei genauerer Betrachtung ist auf den Spitzen eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern erkennbar. In den Tälern liegt die Schichtdicke h_{Tal} verstärkt vor, Abb. 6-32g. Das Verhalten der Tinte mit unterschiedlicher mittlerer Schichtdicke h auf der definierten Substrattopographie bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden, unabhängig von dem Druckdurchgang, wird bei einer annähernd gleichen gesamten Schichtdicke h_{ges} von 75 μm bis 84 μm analysiert. Nach dem fünften Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der Tintenfilm mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm heterogen auf der definierten Substrattopographie W120 vor. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur werden nahezu vollständig aufgefüllt und sind nur noch schwach an der Oberfläche erkennbar. Die ehemals scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung an Tinte abgeschwächt und abgerundet. Auf den Spitzen ist eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern erkennbar. In den Tälern liegt die Schichtdicke h_{Tal} verstärkt vor, Abb. 6-32b. Nach dem siebten Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der Tintenfilm mit einer mittleren Schichtdicke h von 12 μm ebenfalls heterogen auf der definierten Substrattopographie W120 vor. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur werden nahezu vollständig aufgefüllt und sind nur noch schwach an der Oberfläche erkennbar. Die ehemals scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung an Tinte abgerundet. Bei genauerer Betrachtung ist auf den Spitzen eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern erkennbar. In den Tälern liegt die Schichtdicke h_{Tal} verstärkt vor, Abb. 6-32e. Nach dem achten Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der Tintenfilm mit einer mittleren Schichtdicke h von 10 μm nahezu homogen auf der definierten Substrattopographie W120 vor. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur werden weiterhin abgebildet. Lediglich die scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung an Tinte weiter

abgerundet. Bei genauerer Betrachtung ist auf den Spitzen eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern untersucht. In den Tälern liegt die Schichtdicke h_{Tal} verstärkt vor, Abb. 6-32h. Die Auswirkung der reduzierten Schichtdicke h auf die resultierende minimale Rauheit Sa_n , wird in den Abbildungen 6-32c und 6-32f ersichtlich. Nach dem zehnten Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der Tintenfilm mit einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm heterogen auf der definierten Substrattopographie W120 vor. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur sind vollständig aufgefüllt und nicht mehr an der Oberfläche erkennbar. Die ehemals scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung von Tinte entfernt. Auf den Spitzen ist eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern erkennbar. In den Tälern liegt die Schichtdicke h_{Tal} verstärkt vor, Abb. 6-32c. Das gleiche Bild ergibt sich bei einer mittleren Schichtdicke h von 12 μm . Nach dem 20. Druckdurchgang mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt der Tintenfilm mit einer mittleren Schichtdicke h von 12 μm ebenfalls heterogen auf der definierten Substrattopographie W120 vor. Die periodisch angeordneten Strukturelemente der Zahnstruktur sind vollständig aufgefüllt und nicht mehr an der Oberfläche erkennbar. Die ehemals scharfe Kante auf den Spitzen und in den Tälern wurde durch die Ansammlung von Tinte entfernt. Auf den Spitzen ist eine geringere Schichtdicke h_{Spitze} als in den Tälern erkennbar. In den Tälern liegt die Schichtdicke h_{Tal} verstärkt vor, Abb. 6-32f. Ein Rückschluss auf eine gleichmäßige Abbildung der Substrattopographie durch den homogenen Tintenfilm kann anhand dieser Aufnahmen nicht gezogen werden.

Die REM Aufnahmen bestätigen dennoch die zuvor beschriebene Annahme, dass die Masse der Tinte durch eine größere Schichtdicke h zunimmt und somit die Tinte eine größere Fließlänge, innerhalb der vorgegebenen Nivellierungszeit, zurücklegt. Es sammelt sich mehr Tinte in den Tälern, wodurch der Abstand zwischen dem neu entstandenen Minimum im Tal und dem neuen Maximum auf der Spitze geringer wird. Ist die Schichtdicke h gering, legt die Tinte einen geringeren Weg innerhalb der definierten Nivellierungszeit zurück und wird an den Flanken vernetzt. Dadurch wird pro Druckdurchgang weniger Tinte in den Tälern gesammelt und die Substrattopographie zeichnet sich lediglich ab.

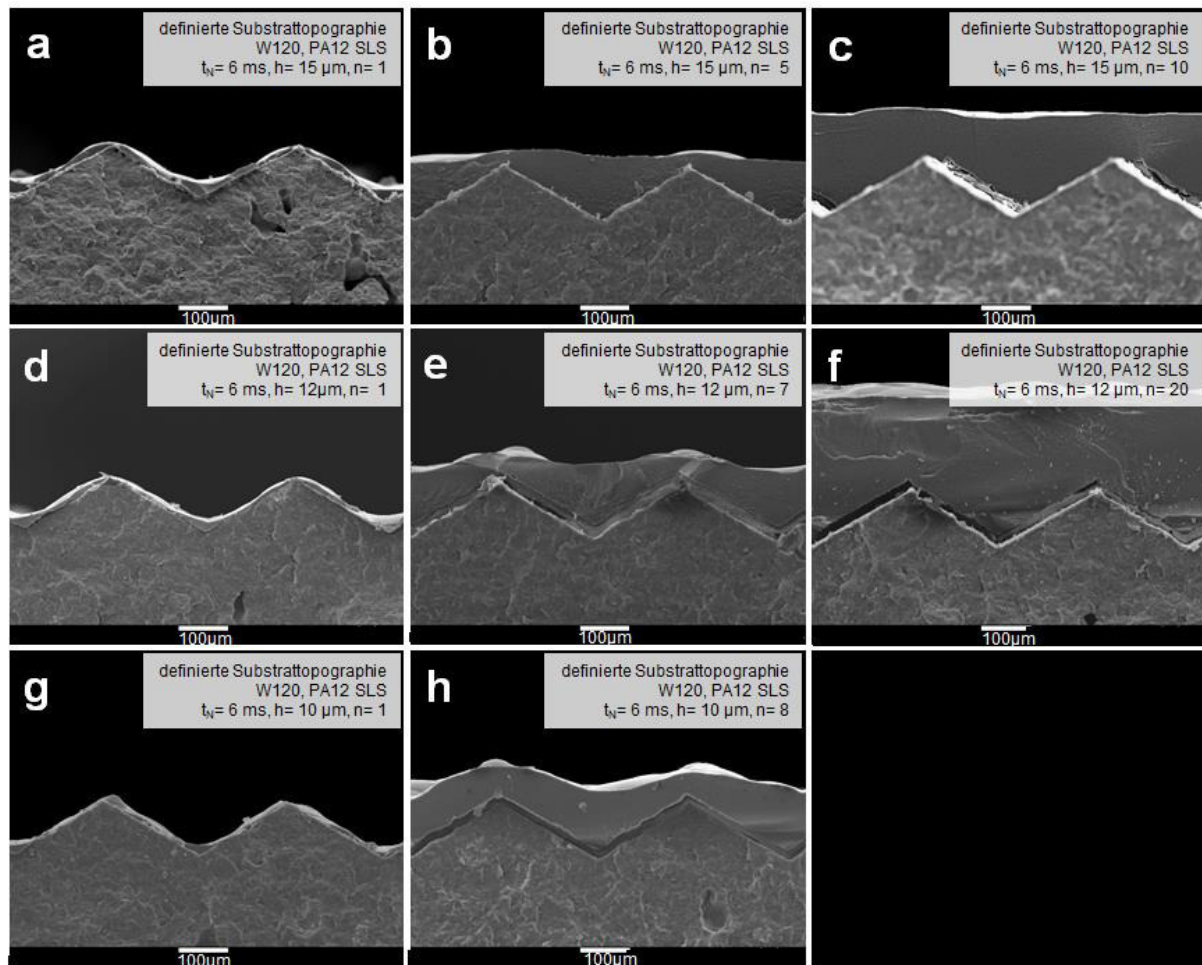


Abbildung 6-32: REM Aufnahmen der Substrattopographie W120 nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden mit a) einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm nach Druckdurchgang 1, b) einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm nach Druckdurchgang 5, c) einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm nach Druckdurchgang 10, d) einer mittleren Schichtdicke h von 12 μm nach Druckdurchgang 1, e) einer mittleren Schichtdicke h von 12 μm nach Druckdurchgang 7, f) einer mittleren Schichtdicke h von 12 μm nach Druckdurchgang 20, g) einer mittleren Schichtdicke h von 10 μm nach Druckdurchgang 1 und h) einer mittleren Schichtdicke h von 10 μm nach Druckdurchgang 8.

Die Verteilung der Tinte auf der Substrattopographie ist mit zunehmender mittlerer Schichtdicke h , wie in den REM Aufnahmen ersichtlich, heterogen. In den Tälern findet sich mehr Tinte als auf den vorhandenen Spitzen, wieder. Mittels der REM Aufnahmen kann stichprobenartig die Schichtdicke h_{Tal} ermittelt werden. Dies bezieht sich auf eine festgelegte Position auf der Substrattopographie, die die jeweilige REM Aufnahme zeigt. Anhand der partiellen Materialverteilung, kann die Schichtdicke h_{Tal} im Tal (Gl. 5.13) berechnet werden. Die bessere Vergleichbarkeit der mittleren Schichtdicke h , die pro Druckdurchgang n auf die definierte Substrattopographie W120 aufgebracht wird, wird durch die Normierung der berechneten Schichtdicke h_{Tal} im Tal auf die jeweilige, aufgedruckte, mittlere Schichtdicke h erreicht. Zusätzlich soll das Fließverhalten der Tinte bei nahezu gleichbleibendem Neigungswinkel β_{tilt} der Strukturelemente analysiert werden, sodass der Einfluss des

Tintenvolumens auf das Fließverhalten deutlich wird. Aus diesem Grund wird auf den linearen Bereich des Glättungsverlauf Sa_n zurückgegriffen, der innerhalb der ersten fünf Druckdurchgänge vorherrscht.

Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem ersten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weit über dem normierten Wert von 1, der eine homogene Schichtdicke h_{Tal} im Tal und h_{Spitze} auf den Spitzen repräsentiert. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,9\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Die gesamte Tinte ist in die Täler geflossen und die Glättung stark vorangeschritten, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem zweiten Druckdurchgang im Tal geringfügig über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,5\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Großteil der Tinte ist in die Täler geflossen, wodurch die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem dritten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,2\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Die Tinte ist in die Täler geflossen, wodurch die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem vierten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ steigt wieder leicht an und entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,5\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Großteil der Tinte ist in die Täler geflossen, wodurch die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem vierten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ steigt wieder leicht an und entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,3\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Die Tinte ist in die Täler geflossen und die Glättung schreitet weiter voran, Abb. 6-33.

Demgegenüber steht die homogene, mittlere Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem ersten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weit über dem normierten Wert von 1, der eine homogene Schichtdicke h_{Tal} im Tal und h_{Spitze} auf den Spitzen repräsentiert. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $2,0\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Die

gesamte Tinte befindet sich in den Tälern, wodurch die Glättung stark voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem zweiten Druckdurchgang im Tal geringfügig über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,5\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Großteil der Tinte ist in die Täler geflossen, wodurch die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem dritten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,2\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Die Tinte ist in die Täler geflossen und die Glättung schreitet weiter voran, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem vierten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ bleibt konstant und entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,2\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Großteil der Tinte befindet sich in den Tälern, wodurch die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem vierten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ bleibt weiter konstant und entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,2\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Tinte ist in die Täler geflossen, wodurch die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33.

Die geringste Schichtdicke h , die auf die Substrattopographie aufgedruckt wird, liegt bei $10\text{ }\mu\text{m}$. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $10\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem ersten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weit über dem normierten Wert von 1, der eine homogene Schichtdicke h_{Tal} im Tal und h_{Spitze} auf den Spitzen repräsentiert. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $10\text{ }\mu\text{m}$ entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $2,1\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Die gesamte Tinte ist in die Täler geflossen, wodurch die Glättung stark voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $10\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem zweiten Druckdurchgang im Tal geringfügig über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $10\text{ }\mu\text{m}$ entspricht nach diesem Druckdurchgang circa $1,3\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Dies bedeutet, dass Tinte in die Täler geflossen ist und die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von $10\text{ }\mu\text{m}$ liegt nach dem dritten Druckdurchgang, aufgrund

des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von 10 μm entspricht nach diesem Druckdurchgang circa 1,1 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Tinte ist in die Täler geflossen ist, wodurch die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von 10 μm liegt nach dem vierten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von 10 μm steigt leicht an und entspricht nach diesem Druckdurchgang circa 1,3 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Es ist vermehrt Tinte in die Täler geflossen, wodurch die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von 10 μm liegt nach dem vierten Druckdurchgang, aufgrund des Fließverhaltens der Tinte, im Tal zunächst weiterhin über dem normierten Wert von 1. Das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h von 10 μm nimmt erneut ab und entspricht nach diesem Druckdurchgang circa 1,1 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Es ist geringfügig Tinte in die Täler geflossen ist und die Glättung weiter voranschreitet, Abb. 6-33.

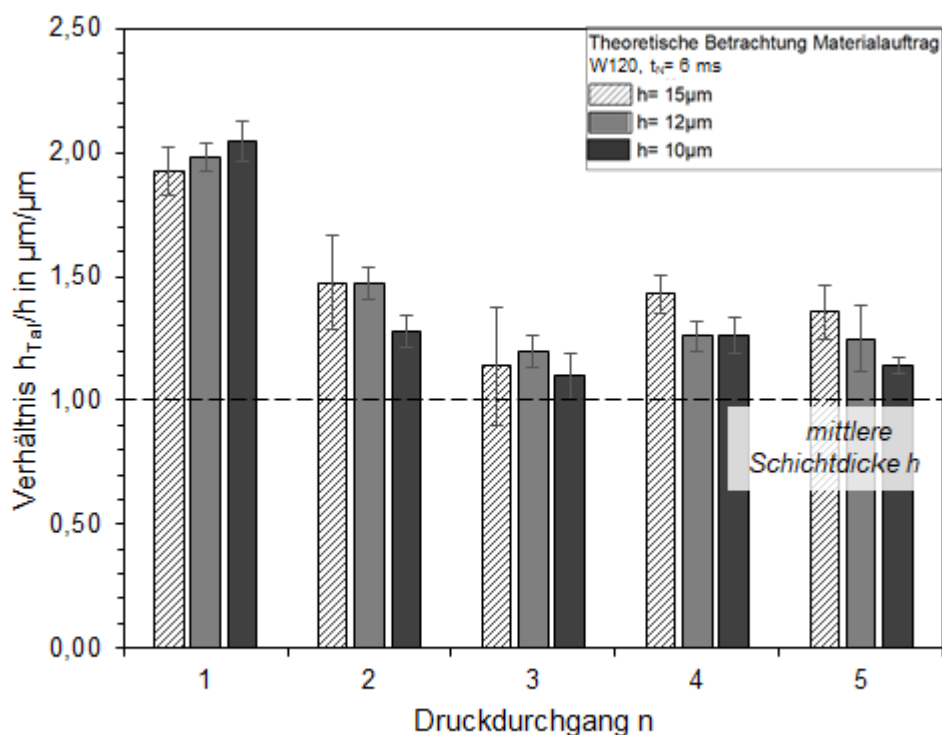


Abbildung 6-33: Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal (Gl. 5.13) zur mittleren Schichtdicke h der definierten Substrattopographie W120 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 10 μm , 12 μm und 15 μm .

Dass nach dem ersten Druckdurchgang die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der mittleren Schichtdicke h von 10 μm stärker ausgeprägt ist, als die Schichtdicke h_{Tal} im Tal der mittleren Schichtdicke h von 12 μm oder 15 μm , liegt vermutlich an der Qualität der Substrattopographie. Die

definierte Substrattopographie W120 hat einen unruhigen Flankenverlauf. Diese Unruhe verursacht Ausreißer in der Konfokalmessung, die die Rauheit R_z erhöht. Durch den ersten Druckdurchgang werden die Unruhen im Flankenverlauf eingeebnet. Durch die Einebnung reduzieren sich die Ausreißer in der Konfokalmessung und die Rauheit R_z wird verringert. Zusätzlich wird aufgrund der Berechnung der Schichtdicke h_{Tal} im Tal durch die Rauheit R_z nach dem ersten Druckdurchgang eine fehlerhafte Schichtdicke h_{Tal} im Tal ermittelt.

In den folgenden Druckdurchgängen nimmt das Verhältnis der Schichtdicke h_{Tal} im Tal zur mittleren, aufgetragenen Schichtdicke h mit größerer mittlerer Schichtdicke h zu. Das größere, aufgedruckte Tintenvolumen beschleunigt die Fließgeschwindigkeit der Tinte auf dem Strukturelement der Substrattopographie. Die Tinte fließt vermehrt in das vorhandene Tal. Die abnehmende Tendenz der Schichtdicke im Tal mit zunehmendem Druckdurchgang, unabhängig von der aufgetragenen mittleren Schichtdicke h , deutet darauf hin, dass die Tinte aufgrund einer anderen Einflussgröße erschwert in die Täler fließt. Da die Nivellierungszeit konstant bleibt, kann sich lediglich der Neigungswinkel der Strukturelemente während dem Druckdurchgang verändern. Eine geringere mittlere Schichtdicke h bleibt, aufgrund der reduzierten Fließgeschwindigkeit, vermehrt auf den Flanken liegen. Diese Tinte bildet die neue Topographie aus und verändert damit den Neigungswinkel der Strukturelemente. Die, auf diesen neu ausgebildeten Neigungswinkel aufgedruckte Tintenschicht fließt langsamer in die Täler, wodurch die Schichtdicke aus dem Druckdurchgang dort weiter sinkt.

6.3.4 Quintessenz

Die Schichtdicke h spielt eine entscheidende Rolle für den Glättungsverlauf Sa_n . Ist diese zu gering, muss die Nivellierungszeit t_N vergrößert werden. Andernfalls wird die Tinte nicht in das Tal transportiert. Allgemein kann der Glättungsverlauf Sa_n , der die Änderung der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n repräsentiert, in drei Abschnitte untergliedert werden, Abb. 6-34. Allgemein kann der Glättungsverlauf Sa_n , der die Änderung der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n repräsentiert, in drei Abschnitte untergliedert werden, Abb. 6-27. Der lineare Abfall der Kurve im ersten Abschnitt gibt indirekt Auskunft über den Füllstand der Tinte im Tal, da mit zunehmender Schichtdicke im Tal die Substrattopographie mehr aufgefüllt wird. Eine größere Schichtdicke im Tal reduziert die arithmetische Mittenrauheit Sa_n stärker. Diese Abnahme verändert die Steigung m im ersten Abschnitt. Der zweite Abschnitt gibt indirekt Auskunft über die Form der Strukturelemente der Substrattopographie. Die Strukturelemente besitzen unterschiedliche Neigungswinkel β_{tilt} . Verändert sich die Form der Strukturelemente, ändert sich der Neigungswinkel β_{tilt} , der wiederum das Fließverhalten der Tinte beeinflusst. Fließt zu wenig Tinte von den Spitzen in die Täler, reduziert sich die arithmetische Mittenrauheit Sa_n langsamer. Der dritte Abschnitt des Glättungsverlaufs Sa_n beschreibt die vorherrschende, dominierende Topographie, die sich bei einer konstanten arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST}

einstellt. Dieser Bereich stellt sich in der Regel ab dem Druckdurchgang $n_{S,full}$ ein, nach dem die Substrattopographie vollständig gefüllt bzw. überfüllt wurde, Abb. 6-34.

Mit abnehmender Schichtdicke h sinkt die Steigung m des nahezu linearen Bereichs im ersten Abschnitt. Vergrößert sich die Schichtdicke h , beschleunigt die Massekraft die Tinte während dem Fließvorgang stärker. Die Tinte erreicht in kürzerer Zeit die Täler und die arithmetische Mittenrauheit Sa_n wird stärker reduziert. Dieses zeichnet sich mit einer steigenden Steigung m aus. Mit abnehmender Schichtdicke h vergrößert sich der Radius r des zweiten Abschnittes. Eine geringere Schichtdicke h verursacht ein langsames Fließen der Tinte. Fließt die Tinte zu langsam, befindet sich neben der Tintenanhäufung im Tal auch Tinte auf den Spitzen. Dies hat zur Folge, dass die arithmetische Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n langsamer abnimmt, woraus ein vergrößerter Radius des Glättungsverlaufs Sa_n im zweiten Abschnitt resultiert. Ist die Substrattopographie nach einem Druckdurchgang $n_{S,full}$ vollständig gefüllt, dominiert die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie, die sich im dritten Abschnitt bei einem konstanten Wert einstellt. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie, wird von der Schichtdicke h nicht beeinflusst.

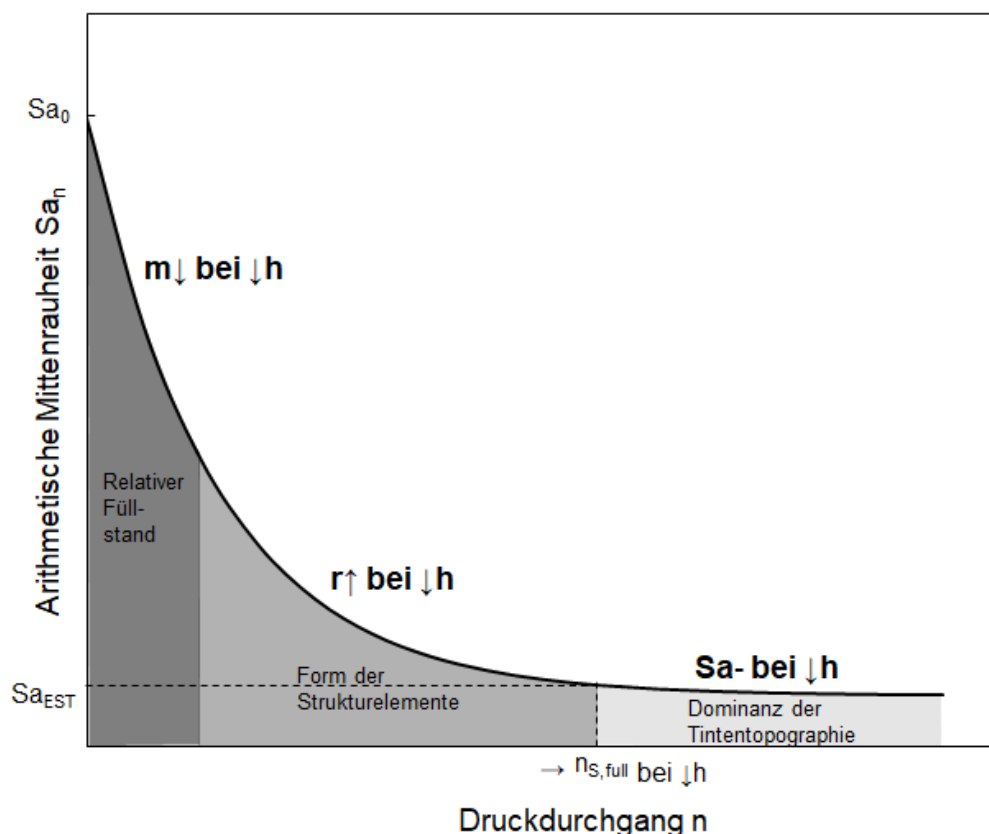


Abbildung 6-34: Schematische Darstellung des Einflusses der mittleren Schichtdicke h auf den Glättungsverlauf mit zunehmendem Druckdurchgang n . Die Steigung m des ersten Abschnitts, nimmt mit abnehmender mittlerer Schichtdicke h ab. Der Radius des zweiten Abschnitts nimmt mit abnehmender mittlerer Schichtdicke h zu. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie bleibt mit abnehmender mittlerer Schichtdicke h unverändert. Die Anzahl der benötigten Druckdurchgänge $n_{S,full}$ wird jedoch größer.

6.4 Einfluss der Auftragsform auf den Glättungsverlauf

Der Milchhaut-Effekt aus Kapitel 5.1.3 zeigt, dass die Handhabung des Prozessschritts beim Glätten rauher Substrattopographien mittels mehrlagigen Inkjet-Drucks die Qualität der Topographie negativ beeinflusst. Aus diesem Grund ist die Kombination der Positionierung der Tintentropfen auf der Substrattopographie mit der direkten Vernetzung der nassen, aufgedruckten Tinte durch die im Drucker integrierte UV-Einheit sinnvoll.

Die Topographie der undefinierten Substrattopographie Wsls der lasergesinterten Platten ist mit seinen stochastisch verteilten Strukturelementen komplexer, als die definierte Substrattopographie W120. Die Tinte fließt unkontrolliert in unterschiedliche Richtung ab, bis diese in ihrem vorherrschenden Zustand nach einer definierten Nivellierungszeit t_N fixiert werden. Die Tinte sammelt sich in den lokalen Tiefen und glättet damit zunächst die Unebenheiten in einer geringeren Größenordnung. Die globalen Täler der Substrattopographie werden weniger effektiv gefüllt und der Glättungsfortschritt ΔSa_n damit verlangsamt. Diese Reihenfolge des Glättungsfortschritts ΔSa_n kann durch das direkte Bedrucken der globalen Täler umgangen werden. Die Positionierung und Höheninformationen der Spitzen und Täler der zu glättenden Substrattopographie werden aufgenommen und in einer Graustufengrafik dargestellt. Die Messfehler werden mittels der Schwellwertsetzung herausgearbeitet und der Kontrast damit verbessert. Die aufgenommene Substrattopographie wird mit der Graustufengrafik bedruckt. Die Täler erhalten je nach Tiefe eine höhere Schichtdicke h als die Spitzen, die durch die Höheninformation nicht bedruckt werden. Die Tinte ist ebenso platziert, wie es nach dem Nivellieren von 20 Sekunden erreicht wird. Die Vernetzung erfolgt jedoch unmittelbar nach dem Aufdrucken, wodurch Vernetzungsdefekte vermieden werden. Dieser Prozess wird selektives Bedrucken genannt.

Der exakte Glättungsverlauf Sa_n des selektiven Bedruckens und die Einordnung in das Modell der Glättung (Gl. 5.6) wird in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

6.4.1 Glättungsverlauf beim selektiven Bedrucken

Der Glättungsverlauf Sa_n bei der Auftragsform des selektiven Bedruckens in Abhängigkeit der Druckdurchgänge n erfolgt mittels der experimentellen Untersuchung AF_1. Aufgrund des unruhigen Verlaufs der Substrattopographie, der sich auf die arithmetische Mittenrauheit Sa_n auswirkt, wird nicht auf die Ausgangsrauheit Sa_0 , sondern auf die arithmetische Mittenrauheit Sa_1 nach dem ersten Druckdurchgang normiert. Durch den ersten Druckdurchgang werden Hinterschneidungen der Substrattopographie in einem ersten Schritt aufgefüllt und können somit vernachlässigt werden.

Der Glättungsverlauf Sa_n des selektiven Bedruckens, folgt einem exponentiellen Verlauf, Abb. 6-35. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 nimmt mit zunehmenden Druckdurchgang n exponentiell ab, Abb. 6-35. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit

fortschreitendem Druckdurchgang n abflacht. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 nimmt bei dem selektiven Bedrucken der Substrattopographie mit einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden innerhalb des ersten Druckdurchgangs von $1,1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei $0,1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Glättungsfortschritt ΔSa_n schreitet bis zum fünften Druckdurchgang nahezu linear voran. Ab dem sechsten Druckdurchgang reduziert sich der Glättungsfortschritt ΔSa_n mit jedem weiteren Druckdurchgang weniger, bis sich nach dem zehnten Druckdurchgang die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} bei einem Verhältnis von $0,17 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ einstellt. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa $0,2 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_1 reduziert sich um circa 80 % und wird nach dem elften Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-35. Das Verhältnis der minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_n von $0,17 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ entspricht einer arithmetischen Mittenrauheit Sa_n von circa $5 \mu\text{m}$ bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden liegt bei $3,66 \mu\text{m}$. Die Substrattopographie dominiert durchgehend die Tintentopographie.

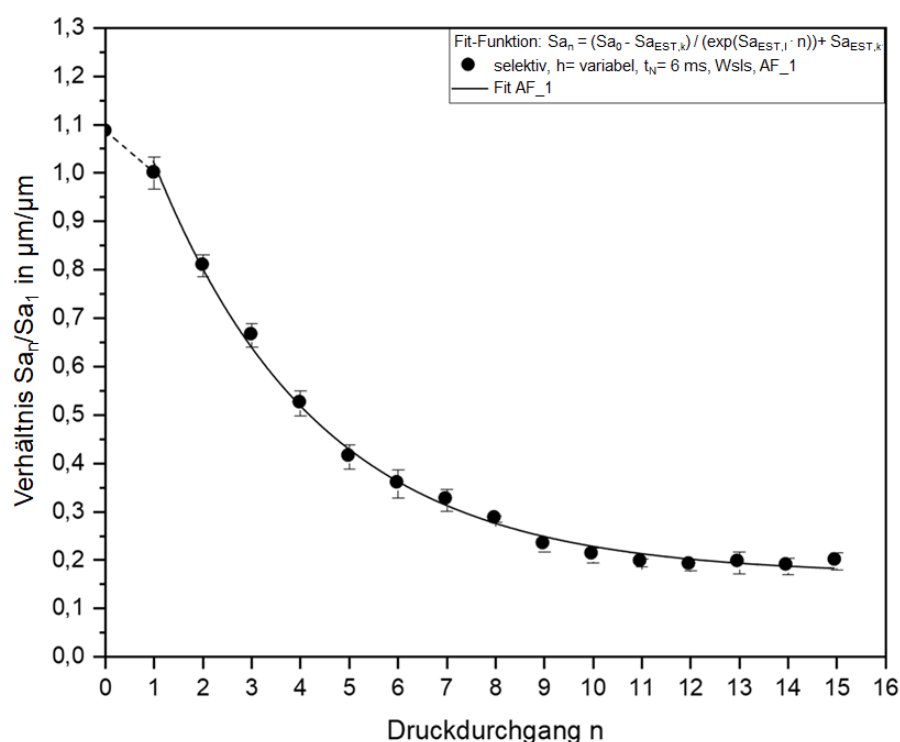


Abbildung 6-35: Darstellung des Glättungsverlaufs durch das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zu Sa_1 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n auf undefinierter Substrattopographie Wsls bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden unter dem Einfluss der Auftragsform des selektiven Bedruckens und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6). (Versuch AF_1)

Das die arithmetische Mittenrauheit Sa_n mit zunehmendem Druckdurchgang n abnimmt, liegt zum einen begründet in der variierenden Schichtdicke h , die durch die Graustufengrafik, die auf die Fläche gedruckt wird, variiert, Abb. 6-36c. Die Spitzen besitzen in der Graustufengrafik einen weißen Farbton, wodurch dort keine Tinte aufgedruckt wird. In den Tälern hingegen wird die maximale Schichtdicke h aufgedruckt, da diese in der Graustufengrafik schwarz dargestellt werden. Die Graustufen von den unterschiedlichen Höhen der Flanken reduzieren damit die aufgedruckte Schichtdicke h entsprechend. Im Vergleich dazu besitzt die Grafik des flächigen Bedruckens mit einem maximalen Schwarzanteil (K-Anteil) von 100 % eine mittlere Schichtdicke h von 15 μm , Abb. 6-36a. Ein reduzierter Schwarzanteil von 70 % des flächigen Bedruckens reduziert die mittlere Schichtdicke h auf 8 μm , Abb. 6-36b. Die mittlere Schichtdicke h von 1 μm wird bei dem flächigen Bedrucken mit einem Schwarzanteil von 10 % erreicht, Abb. 6-36d. Die Grafiken des selektiven Bedruckens sind somit eine Kombination aus verschiedenen Schwarzanteilen in der Grafik, Abb. 6-36c.

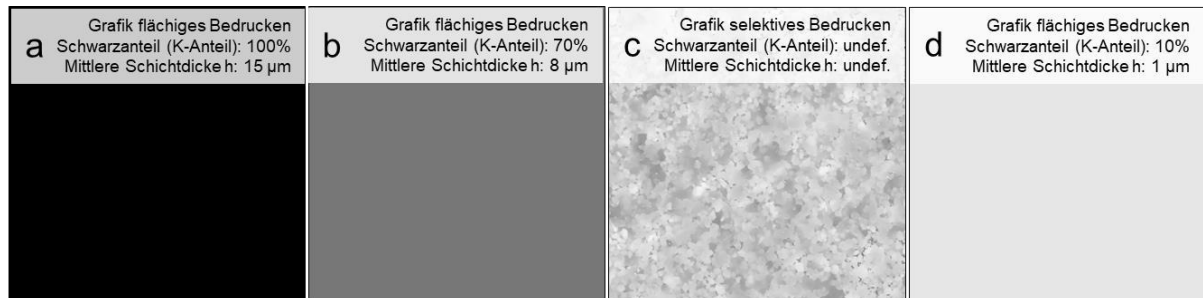


Abbildung 6-36: Analyse der unterschiedlichen Grafiken der Auftragsform des flächigen und des selektiven Bedruckens mit der Grafik a) des flächigen Bedruckens mit einem Schwarzanteil von 100 % und einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm , b) des flächigen Bedruckens mit einem Schwarzanteil von 70 % und einer mittleren Schichtdicke h von 8 μm , c) des selektiven Bedruckens mit einem undefinierten Schwarzanteil und einer undefinierten, mittleren Schichtdicke h , sowie d) des flächigen Bedruckens mit einem Schwarzanteil von 10 % und einer mittleren Schichtdicke h von 1 μm .

In Kapitel 6.3 wurde gezeigt, dass das Fließen bei einer geringen mittleren Schichtdicke h verlangsamt wird. Zusätzlich entschleunigt der vorliegende lokale Neigungswinkel β_{tilt} der Substrattopographie das Fließen der gedruckten mittleren Schichtdicke h , wie in Kapitel 6.1 demonstriert. Da auf die undefinierte Substrattopographie beim selektiven Bedrucken zum einen lokal eine geringe Schichtdicke h appliziert wird und zusätzlich auf der Substrattopographie geringe Neigungswinkel β_{tilt} vorhanden sind, reicht die Triebkraft nicht aus, um die Tinte innerhalb der Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden zum Fließen zu bewegen. Die Substrattopographie wird nicht vollständig gefüllt und dominiert weiterhin. Das selektive Bedrucken reduziert die arithmetische Mittenrauheit Sa_n exponentiell. Das selektive Bedrucken setzt sich aus der geringsten Nivellierungszeit t_N und der Lage der Tinte in den Tälern bei einer hohen Nivellierungszeit t_N zusammen. Aufgrund dieser kontroversen

Konstellation muss die Einordnung der Auftragsform des selektiven Bedruckens in das Modell der Glättung (Gl. 5.6) geprüft werden.

6.4.2 Einordnung in das Modell der Glättung

Die Einordnung des selektiven Bedruckens in das Modell der Glättung (Gl. 5.6) aus Kapitel 6.2.2 erfolgt mittels der experimentellen Untersuchungen AF_1 bis AF_4. Die Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n in Abhängigkeit der Auftragsform wird an der undefinierten Substrattopographie Wsls untersucht. Aufgrund des unruhigen Verlaufs der Substrattopographie, der sich auf die arithmetische Mittenrauheit Sa_n auswirkt, wird nicht auf die Ausgangsrauheit Sa_0 , sondern auf die arithmetische Mittenrauheit Sa_1 nach dem ersten Druckdurchgang normiert. Durch den ersten Druckdurchgang wird der unruhige Verlauf der Substrattopographie zunächst eingeebnet.

Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 nimmt mit zunehmenden Druckdurchgang n exponentiell ab, Abb. 6-37. Der exponentielle Verlauf zeigt, dass während der ersten Druckdurchgänge eine starke Glättung erfolgt, die mit fortschreitendem Druckdurchgang n abflacht. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 nimmt bei dem flächigen Bedrucken unter Verwendung einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm innerhalb des zweiten Druckdurchgangs von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,8 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,2 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa 0,4 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_1 reduziert sich um circa 60 % und wird nach dem zwölften Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-37. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 nimmt bei dem flächigen Bedrucken unter Verwendung einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm innerhalb des zweiten Druckdurchgangs von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,7 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,3 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa 0,03 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_1 reduziert sich um circa 97 % und wird nach dem siebten Druckdurchgang erreicht, Abb. 6-37. Das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 nimmt bei dem flächigen Bedrucken unter Verwendung einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 8 μm innerhalb des zweiten Druckdurchgangs von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf 0,8 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei 0,2 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 von 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa 0,2 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_1 reduziert sich um circa 80 % und wird nach dem elften Druckdurchgang erreicht werden, Abb. 6-37. Das Verhältnis

der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 nimmt bei dem selektiven Bedrucken unter Verwendung einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einer variablen Schichtdicke h innerhalb des zweiten Druckdurchgangs von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf $0,8 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Folglich liegt der Glättungsfortschritt ΔSa_n bei $0,2 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Im gesamten Glättungsverlauf Sa_n nimmt das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zur arithmetischen Mittenrauheit Sa_1 von $1,0 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ auf circa $0,2 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ ab. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_1 reduziert sich um circa 80 % und wird nach dem elften Druckdurchgang erreicht werden, Abb. 6-37.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n nimmt pro Druckdurchgang n ab, sobald die homogene Schicht auf der Substratopographie sich heterogen verteilt. Dafür ist bei dem flächig aufgedruckten Tintenfilm die Fließbewegung des Filmes bei entsprechender Nivellierungszeit t_N notwendig. Der gleichmäßig aufgedruckte Tintenfilm liegt zunächst homogen verteilt auf der Substratopographie vor. Auf der Spitze der Zahnstruktur liegt ebenso viel Tinte, wie in den Tälern und auf den geneigten Zahnflanken. Durch die Hangabtriebskraft und die dazu entgegenwirkende Haftreibung, die auf die Tinte wirken, besitzt die Tinte eine Fließgeschwindigkeit. Die Fließlänge des Films in Richtung des Tales nimmt mit steigender Nivellierungszeit t_N zu und die arithmetische Mittenrauheit Sa_n dementsprechend ab, vgl. Kap. 6.2.3. Dieser Zustand wird durch das selektive Bedrucken der Täler nachgestellt. In den Tälern befindet sich überwiegend Tinte. Auf den Spitzen hingegen wird nur geringfügig Tinte aufgebracht, vgl. Abb. 6-36c. Da das selektive Bedrucken auf die Spitzen und die Flanken nur geringfügig Tinte aufdruckt, zudem diese nach geringer Nivellierungszeit t_N vernetzt wird, findet kein zusätzliches Fließen der Tinte von den aufgedruckten Positionen der Druckpunkte in Richtung der Täler statt. Dadurch kann sich lediglich die in den Tälern aufgedruckte Schichtdicke h bei der Abnahme der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n beteiligen. Eine geringere Schichtdicke h , die bei der flächigen Auftragsform durch die Graustufengrafik eingestellt werden kann, erzielt bei ausreichend langer Nivellierungszeit den Glättungseffekt, der bei der Auftragsform des selektiven Bedruckens entsteht. Wie bereits in Kap. 6.3.3 beschrieben, resultiert die Bewegung der Tinte primär aus der Hangabtriebskraft und der dazu entgegenwirkenden Haftreibung, die bei größerer Schichtdicke h größer ist. Dadurch fließt die Tinte schneller und die Tinte legt eine größere Fließlänge zurückgelegt. Es sammelt sich mehr Tinte im Tal, wodurch die arithmetische Mittenrauheit Sa_n stärker als bei einer geringeren Schichtdicke h der Fall wäre, abnimmt.

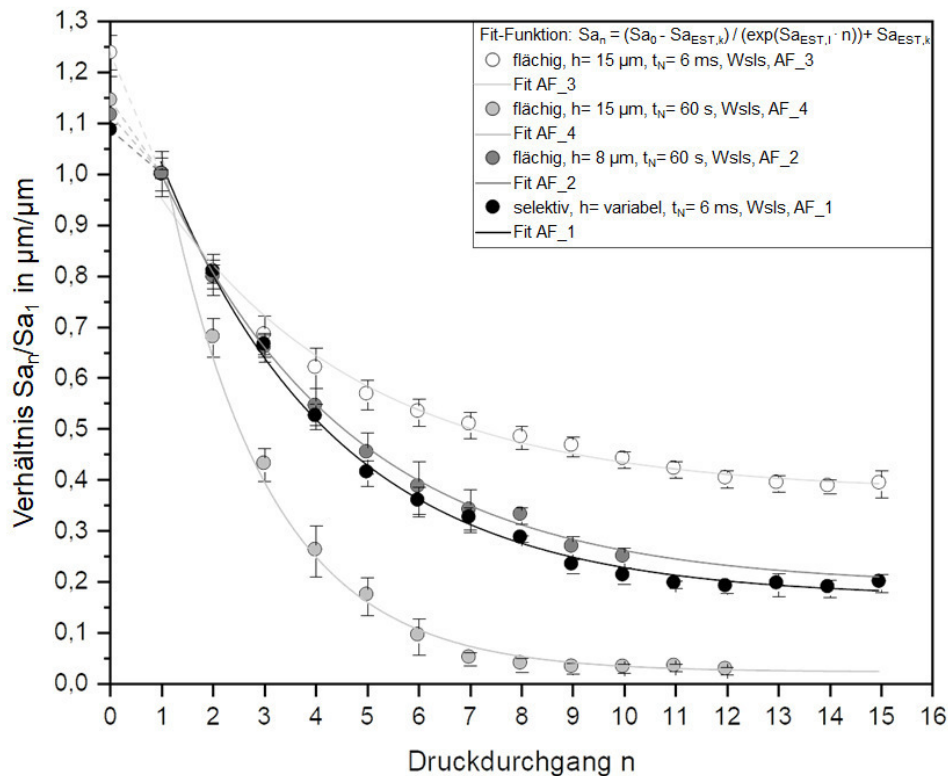


Abbildung 6-377: Darstellung des Glättungsverlaufs durch das Verhältnis der arithmetischen Mittenrauheit Sa_n zu Sa_1 in Abhängigkeit des Druckdurchgangs n auf undefinierter Substratopographie Wsls. Analyse der Auftragsform des selektiven Bedruckens und des flächigen Bedruckens mit Abgleich der beiden Auftragsformen durch Varianzen in der Nivellierungszeit t_N und dem Schichtdicke h und die Verifizierung des Modells der Glättung anhand des Gleichungsfits nach der vereinfachten Gleichung (5.6). (Versuche AF_1 – AF_4)

Der nahezu identische Glättungsverlauf Sa_n des selektiven und des flächigen Bedruckens mit einer Schichtdicke h von 8 µm zeigt, dass das die Auftragsform des selektiven Bedruckens durch das Modell der Glättung (Gl. 5.6) beschrieben werden kann. Eine Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden lässt die gesamte Tinte in die Täler fließen und sich dort ansammeln. Das selektive Bedrucken beschreibt exakt diesen Zustand, da die Tinte direkt in die Täler gedruckt wird. Die Nivellierungszeit t_N liegt dabei bei 6 Millisekunden. Zusätzlich zeigt der identische Glättungsverlauf Sa_n zu dem flächigen Bedrucken mit einer mittleren Schichtdicke h von 8 µm, dass die mittlere Schichtdicke h beim selektiven Bedrucken bei circa 8 µm liegt. Diese Schichtdicke ist jedoch abhängig von der Kontrasteinstellung der Grafik. Wird der Kontrast erhöht, wird die Grafik lokal dunkler. Dies hat zur Folge, dass ein größeres Tintenvolumen an zuvor helleren Graustufen aufgedruckt wird und die Tinte dort schneller beginnt zu fließen. Die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} des selektiven Bedruckens liegt im Glättungsverlauf Sa_n identisch zur minimalen arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} des flächigen Bedruckens unter Verwendung einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einer mittleren

Schichtdicke h von 8 μm . Aufgrund der unterschiedlichen Nivellierungszeiten t_N ist eine unterschiedliche arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie zu erwarten. Da die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} jedoch bei beiden Glättungsverläufen identisch ist, lässt sich aus den vorangegangenen Untersuchungen zur Substratopographie, zur Nivellierungszeit t_N und zur mittleren Schichtdicke h darauf schließen, dass der Neigungswinkel β_{tilt} der einzelnen Strukturelemente einen sehr geringen Wert annimmt, sodass die Tinte innerhalb der vorgegebenen Nivellierungszeit t_N mit der geringen, mittleren Schichtdicke h nicht fließen kann. Dementsprechend wird die Substratopographie von dem Tintenfilm lediglich abgebildet und die Tintentopographie die Substratopographie zu keiner Zeit dominiert.

Die Ergebnisse zeigen, dass der Glättungsverlauf Sa_n des selektiven Bedruckens, dem Glättungsverlauf Sa_n des flächigen Bedruckens unter Verwendung einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einer mittleren Schichtdicke h von 8 μm nachempfunden ist. Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie, liegt jedoch, aufgrund der geringeren Nivellierungszeit t_N , die in dem selektiven Bedrucken verwendet wird, theoretisch höher.

6.4.3 Quintessenz

Das Modell der Glättung (Gl. 5.6) setzt voraus, dass ein geschlossener Film mit einer konstanten, mittleren Schichtdicke h aufgebracht wird. Diese Voraussetzung wird durch das selektive Bedrucken nicht erfüllt. Das selektive Bedrucken empfindet jedoch dem flächigen Bedrucken nach, das mit ausreichend langer Nivellierungszeit t_N durchgeführt wird.

Die Auftragsform des selektiven Bedruckens vereint die Vorteile der Vernetzung nach einer geringen Nivellierungszeit t_N mit dem Glättungsverlauf Sa_n bei einer langen Nivellierungszeit t_N . Die Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden, die den Zeitraum zwischen Druck und anschließendem Vernetzen der Tinte im Drucker repräsentiert, wird im Folgenden „kurze“ (ms) Nivellierungszeit t_N genannt. Eine ausreichend lange Nivellierungszeit t_N , die in den Versuchen bei 60 Sekunden lag, wird hingegen im weiteren Verlauf „lange“ (s) Nivellierungszeit t_N genannt.

Bei dem selektiven Bedrucken wird keine lange Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden benötigt, da die Tinte direkt in die aufzufüllenden Täler platziert wird. Die Tinte benötigt keine Zeit, um in die Täler zu fließen und kann nach einer kurzen Nivellierungszeit t_N vernetzt werden. Der Glättungsverlauf Sa_n des selektiven Bedruckens folgt, aufgrund der Positionierung der Tinte direkt in den Tälern, dem Glättungsverlauf Sa_n des flächigen Bedruckens bei hoher Nivellierungszeit t_N . Da die Tinte in Realität nach kurzer Nivellierungszeit t_N vernetzt wird und somit die Nivellierungszeit t_N tatsächlich bei 6 Millisekunden liegt, wirkt sich dieses auf die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie aus. Diese liegt höher als bei einer nivellierten Tinte.

Die mittlere Schichtdicke h liegt bei dem selektiven Bedrucken unterhalb der maximal möglichen Schichtdicke h von 15 μm , die bei dem flächigen Bedrucken erzielt werden kann. Dies folgt aus der Grafik, die die Täler dunkler einfärbt als die Spitzen. Da auf die Spitzen kein Material aufgedruckt werden soll, liegt in der Grafik der Schwarzanteil an dieser Stelle bei 0 % und dementsprechend liegt keine Schichtdicke h_{Spitze} auf der Spitze vor.

Angepasst an das Modell der Glättung (Gl. 5.6) bedeutet dies, dass der Glättungsverlauf Sa_n entsprechend der arithmetischen Mittenrauheit $Sa_{EST,s}$ der Tintentopographie aus einer langen Nivellierungszeit t_N folgt, jedoch bei der minimal erreichbaren, arithmetische Mittenrauheit $Sa_{EST,ms}$ der Tintentopographie aus einer kurzen Nivellierungszeit t_N stagniert. Das selektive Bedrucken kann somit anhand der Gleichung

$$Sa_n = \frac{Sa_0 - Sa_{EST,ms}}{Sa_{EST,s}} \cdot \frac{1}{n} + Sa_{EST,ms} \quad (5.8)$$

mit:

Sa_n	arithmetische Mittenrauheit nach n Druckdurchgängen,
Sa_0	anfängliche arithmetische Mittenrauheit der Substrattopographie,
$Sa_{EST,ms}$	arithmetische Mittenrauheit der Tintentopographie nach kurzer Nivellierungszeit
$Sa_{EST,s}$	arithmetische Mittenrauheit der Tintentopographie nach langer Nivellierungszeit

beschrieben werden.

Das Vernetzen der Tinte bei kurzer Nivellierungszeit t_N , wie es beim selektiven Bedrucken der Fall ist, eliminiert die möglichen Fehlerbilder, die aufgrund der Lichtstreuung und der Verfahrenswege während der Vernetzung entstehen können. Der Prozess des selektiven Bedruckens ist jedoch sehr langwierig und im aktuellen Zustand nicht wirtschaftlich. Zwar wird die Nivellierungszeit t_N eingespart, jedoch ist die Aufnahme der Topographie und deren Aufbereitung zur Druckgrafik nicht automatisiert und aufwendig und benötigt mehrere Minuten. Zusätzlich ist das zu glättende Feld auf wenige Millimeter begrenzt und entspricht nicht der Größe von Bauteilen, die in der Dimension von mehreren Zentimetern liegt. Da das Ergebnis des selektiven dem des flächigen Bedruckens entspricht, ist die Verwendung eines flächigen Bedruckens mit ausreichend langer Nivellierungszeit t_N sinnvoller, so lange die UV-Einheit mit einem Streulichtfänger ergänzt wird und die Wellenlänge und die Intensität der UV-Strahlung auf die UV-Tinte abgestimmt wurde.

7 Ergebnisse zur Qualitätssicherung des visuellen Eindrucks

Die Qualität des Druckes auf einem Substrat, die Druckbildqualität, wird durch den subjektiven, visuellen Eindruck festgelegt. Diese subjektive Beurteilung des visuellen Eindrucks muss um objektive, messbare Oberflächenkenngrößen ergänzt werden, sodass eine einheitliche Aussage auf die Druckbildqualität gewährleistet wird. Da die Druckbildqualität von der Substrattopographie beeinflusst wird, wird diese in den folgenden Unterkapiteln parametrisiert und im Anschluss die herausgearbeiteten, objektiven Oberflächenkenngrößen für die Analyse der möglichen Druckbildqualität aus den vorangegangenen Glättungsversuchen herangezogen.

7.1 Parametrisierung

Um messbare Oberflächenkenngrößen für die Druckbildqualität zu erhalten, muss der Vergleich zwischen der subjektiven Betrachtung der Druckbildqualität mit den objektiv gemessenen Oberflächenkenngrößen stattfinden. Im Folgenden wird die Druckbildqualität auf unterschiedlichen Substrattopographien durch subjektive Wertung festgelegt und mit den Rauheitskenngrößen der arithmetischen Mittenrauheit S_a , der Kernrauheit S_k mit dem Riefenanteil S_{vk} und dem Spitzenanteil S_{pk} aus der Abbott-Kurve, sowie deren Verhältnisse zueinander, abgeglichen. Hierfür wird der Versuch QM_1, siehe Kap. 4.4.3.6, herangezogen.

7.1.1 Bewertung der visuellen Druckbildqualität

Das Druckbild weist auf der undefinierten Substrattopographie Wsls Verlaufsstörungen der Tinte auf, Abb. 7-1a, die auf die raue Substrattopographie zurückzuführen sind. Die gedruckten Punkte liegen nicht in ihrer runden Form, sondern im deformierten Zustand vor. In den lokal vorhandenen Tälern befinden sich zusätzlich Tintenansammlungen. Dies ist auf das Fließverhalten der unvernetzten, flüssigen Tinte zurückzuführen, die bei ausreichendem Neigungswinkel β_{tilt} der Strukturelemente der Substrattopographie parallel zur Neigungsrichtung in Richtung Tal fließt.

Auf der mechanisch geglätteten Substrattopographie W_{MG} zeigen sich ebenfalls Verlaufsstörungen, die das Druckbild maßgeblich beeinflussen, Abb. 7-1b. Im Gegensatz zu der undefinierten Substrattopographie Wsls wirken diese stärker ausgeprägt. Ein möglicher Grund hierfür ist die durch den Gleitschliffprozess eingeebneten Substrattopographie, die von Spitzen befreiten, dennoch weiterhin vorhandenen Täler auf der Substrattopographie besitzt. Während die Druckpunkte auf der ebenen Fläche in ihrer nahezu ideal runden Form auf der gedruckten Position bleiben, zieht der Kapillareffekt die Tinte in die Täler und stört durch die Deplatziierung und Verformung der Druckpunkte den Farbverlauf. Die Kantenschärfe des Druckbildes auf der chemisch geglätteten Substrattopographie W_{CG} ist schwach ausgeprägt, wodurch das gesamte Druckbild verschwommen wirkt, Abb. 7-1c. Die chemisch abgetragenen Spitzen wurden abgerundet, jedoch nicht vollständig entfernt. Die vorhandene, abgeschwächte Substrattopographie deformiert die Druckpunkte, was zu einer schlechteren Kantenschärfe führt. Die Druckbildqualität auf der mit Inkjet geglätteten Substrattopographie W_{IG} besitzt im Vergleich zu der mechanisch geglätteten und der undefinierten Substrattopographie keine signifikante Verlaufsstörung, Abb. 7-1d. Die Druckpunkte liegen in nahezu runder Form vor und sind gleichmäßig auf der Substrattopographie verteilt.

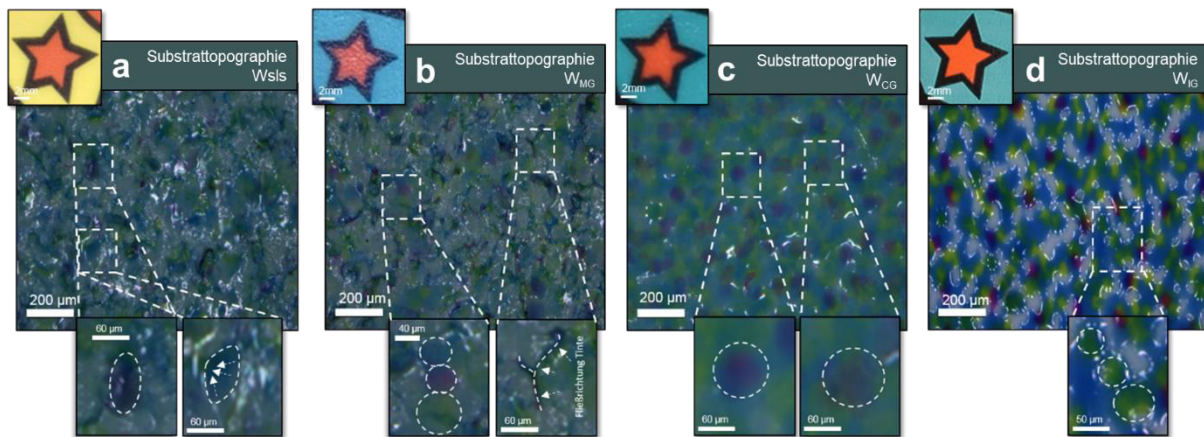


Abbildung 7-1: Analyse der Druckpunktformen bedingt durch die unterschiedlichen Substrattopographien. Zum Vergleich wurden die a) undefinierte Substrattopographie W_{SIs} , b) mechanisch geglättete Substrattopographie W_{MG} , c) chemisch geglättete Substrattopographie W_{CG} und die d) inkjet geglättete Substrattopographie W_{IG} herangezogen. [aus (Gayduschek et al., 2017)]

Der subjektive, visuelle Vergleich der vier Druckbildqualitäten aus Abbildung 7-1 zeigt, dass eine ungenügende Druckbildqualität mit der mechanisch geglätteten Substrattopographie W_{MG} erreicht wird. Zur besseren Visualisierung dieser Wertigkeit wird zusätzlich die Kennziffern 4 eingeführt. Die Druckbildqualität auf der chemisch geglätteten Substrattopographie W_{CG} ist ausreichend und erhält daher die Kennziffer 3. Eine befriedigende Druckbildqualität, und somit die Kennziffer 2, wird auf der undefinierten Substrattopographie W_{SIs} erreicht und die mit Inkjet geglättete Substrattopographie W_{IG} besitzt eine gute Druckbildqualität, die sich durch die Kennziffer 1 auszeichnet.

Die Bewertung der Druckbildqualitäten beruht auf dem Vergleich der Druckbilder untereinander und hebt deren unterschiedliche Qualitäten hervor, nicht jedoch die absolute Druckbildqualität. Zusätzlich basiert die Farbabweichung zwischen den Proben auf den unterschiedlichen Untergrundfarbtönen, die in dieser Arbeit nicht näher betrachtet werden.

7.1.2 Qualifizierung mittels arithmetischer Mittenrauheit

Die Qualifizierung der Druckbildqualität durch die arithmetische Mittenrauheit S_a und der subjektiven Wertigkeit erfolgt mittels der Analyse eines gleichbleibenden Druckbildes auf unterschiedlichen Substrattopographien. Für die Qualifizierung werden die Wertigkeiten der Druckbildqualitäten und die arithmetische Mittenrauheit S_a zusätzlich mit Kennziffern versehen, die die Übereinstimmung der Druckbildqualität mit der arithmetischen Mittenrauheit S_a besser visualisieren. Ein geringer Einfluss auf ein gutes Druckbildergebnis wird mit der Kennziffer 1 versehen. Mit zunehmendem Einfluss nimmt die Kennziffer zu.

Die arithmetische Mittenrauheit S_a der undefinierten Substrattopographie W_{SIs} liegt bei 15,34 µm (Kennziffer 4) und besitzt somit die größte arithmetische Mittenrauheit S_a , Tab. 7-1. Auffällig ist, dass sich die mit Inkjet geglättete Substrattopographie W_{IG} mit 5,49 µm (Kennziffer 3) und die mechanisch geglättete Substrattopographie W_{MG} mit 5,32 µm (Kennziffer 2) in den

Sa-Werten nicht signifikant unterscheiden, Tab. 7-1. Die chemisch geglättete Substrattopographie W_{CG} hat mit $3,85 \mu m$ (Kennziffer 1) die geringste arithmetische Mittenrauheit Sa , Tab. 7-1.

Das Glätten der Substrattopographie W_{IG} durch Bedrucken erzeugt eine homogene Topographie. Da die Tinte in kleine Unebenheiten und Täler der Substrattopographie fließt, vereinheitlicht sie die Topographie und verändert ihre Gestalt in eine gleichmäßige Wellenform. Im Gegensatz dazu, wird auf der Substrattopographie W_{MG} durch den Gleitschliffprozess die Spitzen abgetragen, nicht jedoch die stark ausgeprägten Täler beseitigt. Aus diesem Grund variiert der Sa-Werte der Substrattopographie W_{MG} um seine Standardabweichung stärker als es bei der Substrattopographie W_{IG} der Fall ist. Neben der Oberflächenpräparation können auch stark ausgeprägte Flanken in der Substrattopographie durch das Konfokalmikroskop nicht aufgenommen werden und so das Messergebnis beeinflussen. Dies kann ebenfalls zu einer größeren Standardabweichung führen.

Tabelle 7-1: Tabellarischer Vergleich der subjektiven Wertigkeit der Druckbildqualität mit dem Sa-Wert der Substrattopographien W_{SL} , W_{MG} , W_{CG} und W_{IG} unter Angabe derer Kennziffern in Klammern zur besseren Visualisierung der Übereinstimmung.

<i>Substrat-topographie</i>	<i>Druckbildqualität in Wertigkeit</i>	<i>Mittelwert Sa in μm</i>
W_{SL}	befriedigend (2)	$15,34 \pm 0,14$ (4)
W_{MG}	ungenügend (4)	$5,32 \pm 0,39$ (2)
W_{CG}	ausreichend (3)	$3,85 \pm 0,42$ (1)
W_{IG}	gut (1)	$5,49 \pm 0,07$ (3)

Es wird angenommen, dass sich eine große arithmetische Mittenrauheit Sa negativ auf die Druckbildqualität auswirkt. Die undefinierte Substrattopographie W_{SL} hat den höchsten Sa-Wert und wurde mit der Kennziffer 4 bewertet, obwohl die Wertigkeit der Druckbildqualität „befriedigend“ (Kennziffer 2) ist. Die mechanisch geglättete Substrattopographie W_{MG} besitzt einen geringeren Sa-Wert (Kennziffer 2) als die undefinierte Substrattopographie W_{SL} , hat jedoch mit der Bewertung der Druckbildqualität von „ungenügend“ (Kennziffer 4) ein schlechteres Druckbildergebnis. Die chemisch geglättete Substrattopographie W_{CG} hat, trotz dem geringen Sa-Wert (Kennziffer 1), in der Druckbildqualität nur eine „ausreichende“ Wertigkeit (Kennziffer 3). Signifikant ist der Unterschied zwischen der mechanisch geglätteten Substrattopographie W_{MG} und der mit Inkjet geglätteten Substrattopographie W_{IG} . Während die Druckbildqualität der mechanisch geglätteten Substrattopographie W_{MG} mit der Wertigkeit „ungenügend“ (Kennziffer 4) bewertet wurde, besitzt die mit Inkjet geglättete Substrattopographie W_{IG} mit „gut“ (Kennziffer 1) die beste Wertigkeit der Druckbildqualität.

Obwohl beide Substrattopographien einen ähnlichen *Sa*-Wert besitzen, unterscheiden sich die Wertigkeiten maßgeblich.

7.1.3 Qualifizierung mittels tribologischer Parameter

Da vermutlich die Spitzen und die Täler der Substrattopographie einen Einfluss auf die Wertigkeit der Druckbildqualität haben, muss auf aussagekräftige Oberflächenkenngößen zurückgegriffen werden, die die Neigungswinkel der Strukturelemente der komplexen Substrattopographie Wsls berücksichtigen.

Aus diesem Grund soll in den folgenden Unterkapiteln die Wertigkeit der Druckbildqualität (siehe Kap. 4.4.3.6) mit den Oberflächenkenngößen Kernrauheit *Sk*, reduzierten Spitzenhöhe *Spk* und reduzierten Riefentiefe *Svk* (siehe Kap. 3.3) verglichen werden. Hierzu werden die Wertigkeiten der Druckbildqualität und die Oberflächenkenngößen mit Kennziffern versehen, die die Übereinstimmung der Druckbildqualität mit den Oberflächenkenngößen besser visualisieren. Ein geringer Einfluss auf ein gutes Druckbildergebnis wird mit der Kennziffer 1 versehen. Mit zunehmendem Einfluss nimmt die Kennziffer zu.

7.1.3.1 Analyse der Topographie mittels der Kernrauheit, der reduzierten Spitzenhöhe und der reduzierten Riefentiefe

Die Oberflächenkenngößen Kernrauheit *Sk*, reduzierte Spitzenhöhe *Spk* und reduzierte Riefentiefe *Svk* werden mit Hilfe der Software Mountainsmap der Firma Digital Surf (Besançon, France) aus der Abbott-Kurve (siehe Kap. 3.3) abgeleitet. Da geringe *Sk*-, *Spk*- und *Svk*-Werte zur Vermeidung der Deformation und der Fehlpositionierung der Druckpunkte angestrebt werden, erhält der geringste *Sk*-/ *Spk*-/ *Svk*-Wert die Kennziffer 1 und steigert sich bis auf die Kennziffer 4.

Die undefinierte Substrattopographie Wsls weist im Mittel mit einer Kernrauheit *Sk* von 23,03 µm (Kennziffer 4), einer reduzierten Riefentiefe *Svk* von 39,17 µm (Kennziffer 4) und einer reduzierten Spitzenhöhe *Spk* von 21,57 µm (Kennziffer 4) in allen drei Kenngößen den höchsten Wert auf. Die Wertigkeit der Druckbildqualität wurde mit „befriedigend“ (Kennziffer 2) bewertet, Tab. 7-2. Die mechanisch geglättete Substrattopographie *W_{MG}* besitzt im Mittel eine Kernrauheit *Sk* von 10,05 µm (Kennziffer 2), eine reduzierten Riefentiefe *Svk* von 18,52 µm (Kennziffer 3) und eine reduzierten Spitzenhöhe *Spk* von 4,74 µm (Kennziffer 2). Die Wertigkeit der Druckbildqualität wurde mit „ungenügend“ (Kennziffer 4) bewertet, Tab. 7-2. Die chemisch geglättete Substrattopographie *W_{CG}* hat im Mittel eine Kernrauheit *Sk* von 0,47 µm (Kennziffer 1), eine reduzierten Riefentiefe *Svk* von 0,54 µm (Kennziffer 1) und eine reduzierten Spitzenhöhe *Spk* von 0,27 µm (Kennziffer 1). Die Wertigkeit der Druckbildqualität wurde mit „ausreichend“ (Kennziffer 3) bewertet, Tab. 7-2. Die mit Inkjet geglättete Substrattopographie *W_{IG}* besitzt im Mittel eine Kernrauheit *Sk* von 16,43 µm (Kennziffer 3), eine reduzierten Riefentiefe *Svk* von 9,62 µm (Kennziffer 2) und eine reduzierten Spitzenhöhe

Spk von $10,37 \mu\text{m}$ (Kennziffer 3). Die Wertigkeit der Druckbildqualität wurde mit „gut“ (Kennziffer 1) bewertet, Tab. 7-2.

Tabelle 7-2: *Tabellarischer Vergleich der subjektiven Wertigkeit der Druckbildqualität mit den gemessenen Oberflächenkenngrößen Sk -, Spk - und Svk -Wert der mechanisch geglätteten W_{MG} , undefinierten W_{SL} , der chemisch geglätteten W_{CG} und mit Inkjet geglättete W_{IG} Substrattopographie unter Angabe derer Kennziffern in Klammern zur besseren Visualisierung der Übereinstimmung.*

Substrat-topographie	Druckbildqualität in Wertigkeit	Mittelwert Sk in μm	Mittelwert Spk in μm	Mittelwert Svk in μm
W_{SL}	befriedigend (2)	$23,03 \pm 0,602$ (4)	$21,57 \pm 1,144$ (4)	$39,17 \pm 1,725$ (4)
W_{MG}	ungenügend (4)	$10,05 \pm 1,893$ (2)	$4,74 \pm 0,167$ (2)	$18,52 \pm 1,841$ (3)
W_{CG}	ausreichend (3)	$0,47 \pm 0,03$ (1)	$0,27 \pm 0,07$ (1)	$0,54 \pm 0,03$ (1)
W_{IG}	gut (1)	$16,43 \pm 0,287$ (3)	$10,37 \pm 0,690$ (3)	$9,62 \pm 0,379$ (2)

Der hohe Svk -Wert weist darauf hin, dass die Substrattopographie Täler besitzt, in denen sich die Tinte nach dem Druckvorgang ansammeln wird. Dies ist im Fall des Druckens unerwünscht, da die gleichmäßige Verteilung und die Positioniergenauigkeit der Druckpunkte für ein gutes Druckergebnis essentiell sind. Die Ausprägung des Spk -Wertes gibt Aufschluss über überstehenden Spitzen. Ein hoher Wert wird somit das Fließen der Druckpunkte, und daraus resultierend die Deformation, begünstigen.

7.1.3.2 Analyse der Topographie mittels der Verhältnisse Spk zu Sk , Svk zu Sk und Spk zu Svk

Das Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur Kernrauheit Sk (Spk/Sk -Verhältnis) repräsentiert das Verhältnis der reduzierten Höhe überstehender Spitzen zu dem tragenden Bereich der Fläche. Die Ausprägung des Verhältnisses gibt an, ob eine Druckpunktdeformation aufgrund stärker ausgeprägter Spitzen, wahrscheinlich ist. Dies wird theoretisch positiv beeinflusst, je stärker der Kernrauheitsbereich Sk das Verhältnis dominiert. Das Verhältnis der reduzierten Riefentiefe Svk zur Kernrauheit Sk (Svk/Sk -Verhältnis) zeigt das Verhältnis der reduzierten Riefentiefe zum tragenden Bereich der Fläche. Die Ausprägung des Verhältnisses gibt an, ob die Tinte überwiegend in den Tälern der Substrattopographie liegen wird. Dieses ist reduziert, je weniger die reduzierte Riefentiefe Svk das Verhältnis dominiert. Das Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur reduzierten Riefentiefe Svk (Spk/Svk -Verhältnis) ist eine Relation zwischen der reduzierten Riefentiefe und der reduzierten Spitzenhöhe und gibt Auskunft über die Gleichmäßigkeit der Substrattopographie. Diese Gleichmäßigkeit wird positiv beeinflusst, je näher das Spk/Svk -Verhältnis dem Wert $1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ kommt.

Die undefinierte Substrattopographie W_{sls} weist im Mittel ein Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur Kernrauheit Sk von $0,94 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 4), ein Verhältnis der reduzierten Riefentiefe Svk zur Kernrauheit Sk von $1,70 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 3) und ein Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur reduzierten Riefentiefe Svk von $0,55 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 2) auf. Die Wertigkeit der Druckbildqualität wurde mit „befriedigend“ bewertet und hat die Kennziffer 2, Tab. 7-3. Die mechanisch geglättete Substrattopographie W_{MG} besitzt im Mittel ein Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur Kernrauheit Sk von $0,49 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 1), ein Verhältnis der reduzierten Riefentiefe Svk zur Kernrauheit Sk von $1,9 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 4) und ein Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur reduzierten Riefentiefe Svk von $0,26 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 4). Die Wertigkeit der Druckbildqualität wurde mit „ungenügend“ und der Kennziffer 4 bewertet, Tab. 7-3. Die chemisch geglättete Substrattopographie W_{CG} hat im Mittel ein Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur Kernrauheit Sk von $0,6 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 2), ein Verhältnis der reduzierten Riefentiefe Svk zur Kernrauheit Sk von $1,17 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 2) und ein Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur reduzierten Riefentiefe Svk von $0,5 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 3). Die Wertigkeit der Druckbildqualität wurde mit „ausreichend“ und der Kennziffer 3 bewertet, Tab. 7-3. Die mit Inkjet geglättete Substrattopographie W_{IG} besitzt im Mittel ein Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur Kernrauheit Sk von $0,63 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 3), ein Verhältnis der reduzierten Riefentiefe Svk zur Kernrauheit Sk von $0,59 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 1) und ein Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur reduzierten Riefentiefe Svk von $1,08 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ (Kennziffer 1). Die Wertigkeit der Druckbildqualität wurde mit „gut“ und der Kennziffer 1 bewertet, Tab. 7-3.

Tabelle 7-3: *Tabellarischer Vergleich der subjektiven Wertigkeit der Druckbildqualität mit dem berechneten Spk/Sk -, Svk/Sk - und Spk/Svk -Verhältnis der Substrattopographie W_{sls}, W_{MG}, W_{CG} und W_{IG} unter Angabe derer Kennziffern in Klammern zur besseren Visualisierung der Übereinstimmung.*

Substrat-topographie	Druckbildqualität in Wertigkeit	Verhältnis Spk/Sk in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	Verhältnis Svk/Sk in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$	Verhältnis Spk/Svk in $\mu\text{m}/\mu\text{m}$
W _{sls}	befriedigend (2)	$0,94 \pm 0,06$ (4)	$1,70 \pm 0,12$ (3)	$0,55 \pm 0,10$ (2)
W _{MG}	ungenügend (4)	$0,49 \pm 0,09$ (1)	$1,90 \pm 0,35$ (4)	$0,26 \pm 0,28$ (4)
W _{CG}	ausreichend (3)	$0,60 \pm 0,18$ (2)	$1,17 \pm 0,13$ (2)	$0,50 \pm 0,10$ (3)
W _{IG}	gut (1)	$0,63 \pm 0,29$ (3)	$0,59 \pm 0,03$ (1)	$1,08 \pm 0,04$ (1)

Die Ausprägung der Spitzen und Täler auf der Substrattopographie beeinflusst die Druckbildqualität maßgeblich und wird mit dem Svk/Sk - bzw. dem Spk/Sk -Verhältnis repräsentiert. Das hohe Svk/Sk -Verhältnis, wie die mechanisch geglätteten

Substrattopographie W_{MG} zeigt, beschreibt tiefe Täler auf der Substrattopographie, in die die Tinte durch die Kapillarkraft hineingezogen wird. Daraus folgt, dass die Druckpunkte deformieren. Ein geringes Svk/Sk -Verhältnis reduziert die Druckpunktdeformation und die Druckbildqualität wird gesteigert, wie die Inkjet geglättete Substrattopographie in der Abbildung 7-1d zeigt. Ein geringes Spk/Sk -Verhältnis, wie die mechanisch geglätteten Substrattopographie W_{MG} verdeutlicht, zeigt, dass auf der Substrattopographie lokal nahezu planare Bereiche vorliegen. Für das Druckbild bedeutet dies, dass aufgedruckte Druckpunkte in diesem Bereich in einer relativ runden Form vorliegen. Ein hohes Spk/Sk -Verhältnisses, wie die undefinierte Substrattopographie W_{SL} zeigt, deutet darauf hin, dass die Substrattopographie hervorstehende Spitzen besitzt, von denen die Druckpunkte abfließen und so deformieren. Ein Spk/Svk -Verhältnis, das unter- oder oberhalb des Wertes von $1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ liegt, zeigt die mechanisch geglätteten Substrattopographie W_{MG} . Der Anteil der Spitzen zu den Tälern der Substrattopographie ist ungleichmäßig ausgeprägt. Die Druckpunktform variiert von einer ideal runden Form bis hin zu der vollständigen Deformation aufgrund der vorliegenden Täler. Liegt das Spk/Svk -Verhältnis nahe dem Wert von $1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$, wie die Inkjet geglättete Substrattopographie W_{IG} zeigt, ist die Substrattopographie gleichmäßig und die Spitzen und die Täler sind im gleichen Maße ausgeprägt. Daraus folgt, dass die Druckpunktform der einzelnen Druckpunkte ebenfalls gleichmäßig ist.

7.1.4 Quintessenz

Aus dem Vergleich der Wertigkeit der Druckbildqualität mit der Oberflächenkenngröße der arithmetischen Mittenrauheit S_a resultiert, dass die arithmetische Mittenrauheit S_a zwar die Verringerung der Rauheit mit zunehmendem Druckdurchgang n darstellen kann, jedoch nur eine ungenügende Auskunft über die daraus resultierende Druckbildqualität gibt. Die Korrelation der Druckbildqualität und der Kenngrößen Sk , Spk und Svk zeigt, dass diese Kenngrößen den Einfluss der Topographie auf die Druckbildqualität nicht beschreiben können. Diese Kenngrößen sind Absolutwerte der Topographie, wodurch sich die maximale Rauheit auf das Ergebnis auswirkt. Die Korrelation der Druckbildqualität und der Verhältnisse Svk/Sk , Spk/Sk und Spk/Svk zeigt, dass insbesondere das Verhältnis Spk/Svk mit der Druckbildqualität tendenziell übereinstimmt. Das Spk/Svk -Verhältnis gibt die gleichmäßige Wellenform der Substrattopographie an, deren Ausprägung ebenfalls mit dem Svk/Sk - bzw. Spk/Sk -Verhältnis bestimmt wird. Um eine gute Vorhersage zur Druckbildqualität zu bekommen, ist somit neben der Betrachtung des Spk/Svk -Verhältnisses die Analyse eines der zwei Verhältnisse Svk/Sk bzw. Spk/Sk sinnvoll. Zum einen gibt das Svk/Sk -Verhältnis Aufschluss über die Täler, in denen sich die unvernetzte Tinte ansammelt und die Druckpunkte maßgeblich deformieren und deplatzen. Das Spk/Sk -Verhältnis gibt Auskunft über die herausragenden Spitzen, an denen Tinte aufgrund des Neigungswinkel β_{tilt} abfließt, was die Druckpunkte ebenfalls deformiert und deplatziert.

7.2 Analyse der Glättungsergebnisse anhand der Parametrisierung

Das Verhältnis der reduzierten Spitzenhöhe Spk zur reduzierten Riefentiefe Svk (Spk/Svk -Verhältnis) gibt Auskunft über die voraussichtliche, visuelle Druckbildqualität, die nach dem Farbdruck vorliegen wird. Liegt dieses bei circa $1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$, sind die Spitzen und die Täler gleichstark ausgeprägt. Die Substrattopographie nähert sich einer gleichmäßig wellenförmigen Topographie an. Die Ausprägung der Wellenform wird durch das Svk/Sk -Verhältnis analysiert. Da nicht nur die visuelle Wahrnehmung, sondern auch das haptische Empfinden eine Rolle spielt, muss zusätzlich die minimal erreichbare Rauheit, die mit der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie beschrieben wird, reduziert werden. Diese Oberflächenkennwerte werden in den folgenden Unterkapiteln die voraussichtliche Druckbildqualität der vorangegangenen Glättungsversuche bestimmen.

7.2.1 Parameterstudie der Substrattopographie

Der Einfluss der Substrattopographie ist bei einer kurzen Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden verstärkt erkennbar. Aus diesem Grund wird die mögliche Druckbildqualität bei dieser Nivellierungszeit näher betrachtet.

In den vorangegangenen Versuchen, in denen die Glättungsverläufe der definierten Substrattopographien W100, W120, W135 und der undefinierten Substrattopographie Wsls bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden untersucht wurden, zeigte sich, dass die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} unabhängig von der Substrattopographie bei $3,5 \mu\text{m}$ liegt, Abb. 7-2. Das haptische Empfinden ist nach der Glättung bei den vier Substrattopographien identisch. Die undefinierte Substrattopographie Wsls besitzt ein Spk/Svk -Verhältnis von circa $0,8 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit $0,39 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ nur gering ausgeprägt, Abb. 7-2. Die definierte Substrattopographie W100 besitzt ein Spk/Svk -Verhältnis von circa $0,92 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert schwach die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit $0,91 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ gleichmäßig ausgeprägt, Abb. 7-2. Die definierte Substrattopographie W120 besitzt ein Spk/Svk -Verhältnis von circa $0,9 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit $0,88 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ gleichmäßig ausgeprägt, Abb. 7-2. Die definierte Substrattopographie W135 besitzt ein Spk/Svk -Verhältnis von circa $0,9 \mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert schwach die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit $0,86 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ gleichmäßig ausgeprägt, Abb. 7-2.

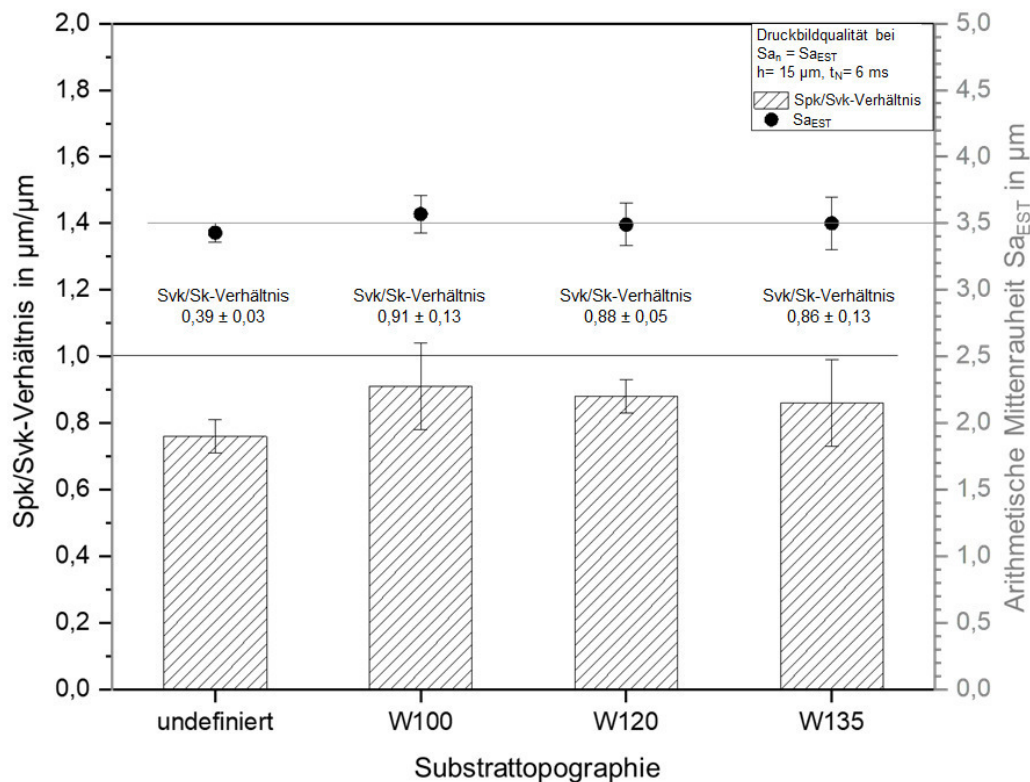


Abbildung 7-2: Einfluss der undefinierten und definierten Substrattopographie auf die voraussichtliche subjektive Wertigkeit der Druckbildqualität anhand der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} , dem Spk/Svk-Verhältnisses und dem Svk/Sk-Verhältnisses.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} entspricht der Tintentopographie, die, nachdem die Substrattopographie vollständig gefüllt wurde, ihre charakteristische wellenförmige Struktur auf Basis der perlenförmigen Anordnung der Druckpunkte annimmt. Das geringe Spk/Svk-Verhältnis der undefinierten Substrattopographie Wsls wird die Druckbildqualität vermutlich negativ beeinflussen. Durch den dominierenden Riefenanteil Svk werden die Druckpunkte wahrscheinlich geringfügig deformiert und nicht in gleichmäßig runder Form vorliegen. Die Kapillarkräfte ziehen den Druckpunkt vermutlich entlang der Täler und die Schärfe des Druckbilds nimmt wahrscheinlich ab. Zwar ist die wellenförmige Struktur nicht gleichmäßig ausgeprägt, jedoch ist das Svk/Sk-Verhältnis nur gering, sodass ganzheitlich betrachtet die Substrattopographie eine ungleichmäßige, gering ausgeprägte wellenförmige Topographie besitzt. Dieses wird sich mutmaßlich positiv auf die Druckbildqualität auswirken. Das nahe $1 \mu m/\mu m$ liegende Spk/Svk-Verhältnis der definierten Substrattopographien W100, W120 und W135 wird die Druckbildqualität voraussichtlich positiv beeinflussen. Die Topographie ist mit einem gleichmäßigen Anteil an Tälern und Spitzen durchzogen. Die Druckpunkte werden wahrscheinlich in einem annähernd runden Zustand vorliegen, wodurch das Druckbild exakt

abgebildet wird. Zwar ist die wellenförmige Struktur gleichmäßig ausgeprägt, jedoch ist das Svk/Sk -Verhältnis vergleichsweise hoch, sodass ganzheitlich betrachtet die Substrattopographie eine gleichmäßige, stärker ausgeprägte wellenförmige Topographie besitzt. Dieses wird sich voraussichtlich dennoch positiv auf die Druckbildqualität auswirken.

Es ist zu erwarten, dass die Druckbildqualität nach dem Glättungsdurchgang sehr gut ist und die anfängliche Substrattopographie keinen signifikanten Einfluss darauf besitzt. Der geringe Sa -Wert kombiniert die Druckbildqualität mit einem sehr guten haptischen Empfinden.

7.2.2 Parameterstudie der Nivellierungszeit

Der Einfluss der Nivellierungszeit t_N ist bei einer mittleren Schichtdicke h von 15 μm verstärkt erkennbar. Aus diesem Grund wird die mögliche Druckbildqualität bei dieser mittleren Schichtdicke h näher betrachtet.

In den vorangegangenen Versuchen, in denen die Glättungsverläufe der definierten Substrattopographien W120 bei einer Schichtdicke h von 15 μm mit zunehmender Nivellierungszeit t_N untersucht wurden, zeigte sich, dass die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden bei 3,5 μm liegt. Mit zunehmender Nivellierungszeit t_N nimmt die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} exponentiell ab, bis sie ab einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden bei circa 1 μm konstant bleibt, Abb. 7-3. Das haptische Empfinden wird nach der Glättung mit steigender Nivellierungszeit t_N verbessert. Die definierte Substrattopographie W120 besitzt nach einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden ein Spk/Svk -Verhältnis von circa 0,90 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit 0,88 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ nur gering ausgeprägt, Abb. 7-3. Die definierte Substrattopographie W120 hat nach einer Nivellierungszeit t_N von 20 Sekunden ein Spk/Svk -Verhältnis von circa 1,35 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert schwach die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit 0,87 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ gleichmäßig ausgeprägt, Abb. 7-3. Die definierte Substrattopographie W120 besitzt nach einer Nivellierungszeit t_N von 40 Sekunden ein Spk/Svk -Verhältnis von circa 1,25 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit 1,26 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ gleichmäßig ausgeprägt, Abb. 7-3. Die definierte Substrattopographie W120 hat nach einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden ein Spk/Svk -Verhältnis von circa 1,45 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert schwach die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit 0,85 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ gleichmäßig ausgeprägt, Abb. 7-3.

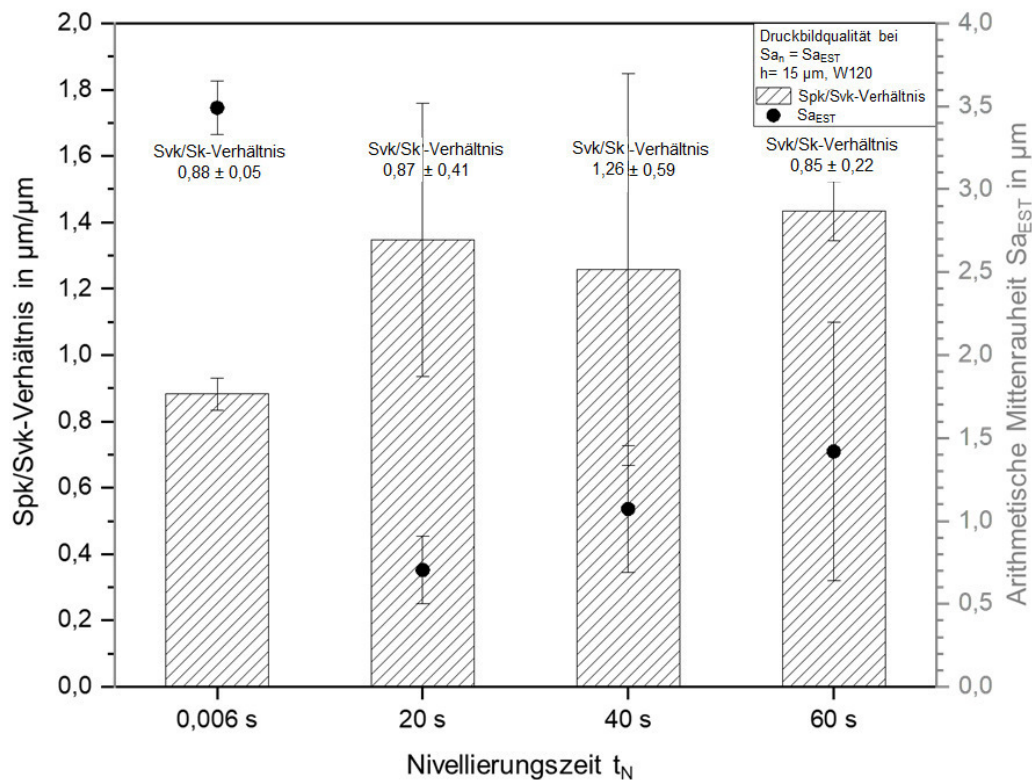


Abbildung 7-3: Einfluss der Nivellierungszeit t_N auf die voraussichtliche subjektive Wertigkeit der Druckbildqualität anhand der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} , dem Spk/Svk-Verhältnisses und dem Svk/Sk-Verhältnisses.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} entspricht der Tintentopographie, die mit zunehmender Nivellierungszeit t_N , ihre charakteristische wellenförmige Topographie auf Basis der perlenförmigen Anordnung der Druckpunkte erhält und in eine Ebene transformiert. Grundlegend wird mit zunehmender Nivellierungszeit t_N die minimal erreichbare arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} reduziert, bis die Oberflächenspannung die Tinte ins Gleichgewicht gebracht hat. Dadurch wird der haptische Eindruck verbessert. Das nahe $1 \mu\text{m}/\mu\text{m}$ liegende Spk/Svk-Verhältnis der definierten Substrattopographien W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden wird die Druckbildqualität voraussichtlich positiv beeinflussen. Die Topographie ist mit einem gleichmäßigen Anteil an Tälern und Spitzen durchzogen. Die Druckpunkte werden vermutlich in einem annähernd runden Zustand vorliegen, wodurch das Druckbild exakt abgebildet wird. Zwar ist die wellenförmige Struktur gleichmäßig ausgeprägt, jedoch ist das Svk/Sk-Verhältnis vergleichsweise hoch, sodass ganzheitlich betrachtet die Substrattopographie eine gleichmäßige, stärker ausgeprägte wellenförmige Topographie besitzt. Dieses wird sich wahrscheinlich dennoch positiv auf die Druckbildqualität auswirken. Das hohe Spk/Svk-Verhältnis der definierten Substrattopographien W120 bei einer Nivellierungszeit t_N größer 20 Sekunden wird die Druckbildqualität voraussichtlich negativ

beeinflussen. Durch den dominierenden Riefenanteil Svk werden die Druckpunkte wahrscheinlich geringfügig deformiert und nicht in gleichmäßig runder Form vorliegen. Die Kapillarkräfte werden den Druckpunkt vermutlich entlang der Täler ziehen. Das Druckbild wird voraussichtlich an Schärfe einbüßen. Zusätzlich liegt das Svk/Sk -Verhältnis vergleichsweise hoch, sodass ganzheitlich betrachtet die Substrattopographie eine ungleichmäßige, stärker ausgeprägte wellenförmige Topographie besitzt. Dieses wird sich ebenfalls voraussichtlich negativ auf die Druckbildqualität auswirken. Die Standardabweichung der beiden Verhältnisse zeigt, dass die Topographie starken Schwankungen unterliegt, die auf Oberflächendefekte der nivellierten Topographie, aufgrund einer fehlerhaften Abstimmung der Tinte zur UV-Einheit, zurückzuführen ist.

Die Glättung mit einer höheren Nivellierungszeit t_N erzeugt einen besseren haptischen Eindruck der Oberfläche, da die Tintentopographie Sa_{EST} einen geringeren Wert besitzt. Gleichzeitig deutet das Nivellieren durch seine große Standardabweichung darauf hin, dass die Tinte ungleichmäßig vernetzt und sich Defekte in dem Film bilden. Der Gesamteindruck des Druckbildes wird voraussichtlich gestört.

7.2.3 Parameterstudie der Schichtdicke

Der Einfluss der mittleren Schichtdicke h ist auf der definierten Substrattopographie W120 bei einer kurzen Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden verstärkt erkennbar. Aus diesem Grund wird die mögliche Druckbildqualität bei dieser Nivellierungszeit näher betrachtet.

In den vorangegangenen Versuchen, in denen die Glättungsverläufe der definierten Substrattopographien W120 bei einer Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden mit zunehmender mittlerer Schichtdicke h untersucht wurden, zeigte sich, dass die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} unabhängig von der mittleren Schichtdicke h bei circa $3,5\text{ }\mu\text{m}$ liegt, Abb. 7-4. Das haptische Empfinden ist nach der Glättung mit den drei unterschiedlichen Schichtdicken identisch. Die definierte Substrattopographie W120 besitzt mit einem mittleren Auftrag mit einer mittleren Schichtdicke h von $10\text{ }\mu\text{m}$ ein Spk/Svk -Verhältnis von circa $0,70\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit $0,67\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$ gering ausgeprägt, Abb. 7-4. Die definierte Substrattopographie W120 besitzt mit einem mittleren Auftrag mit einer mittleren Schichtdicke h von $12\text{ }\mu\text{m}$ ein Spk/Svk -Verhältnis von circa $0,95\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert schwach die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit $0,37\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$ gering ausgeprägt, Abb. 7-4. Die definierte Substrattopographie W120 besitzt mit einem mittleren Auftrag mit einer mittleren Schichtdicke h von $15\text{ }\mu\text{m}$ ein Spk/Svk -Verhältnis von circa $0,90\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit $0,42\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$ gering ausgeprägt, Abb. 7-4.

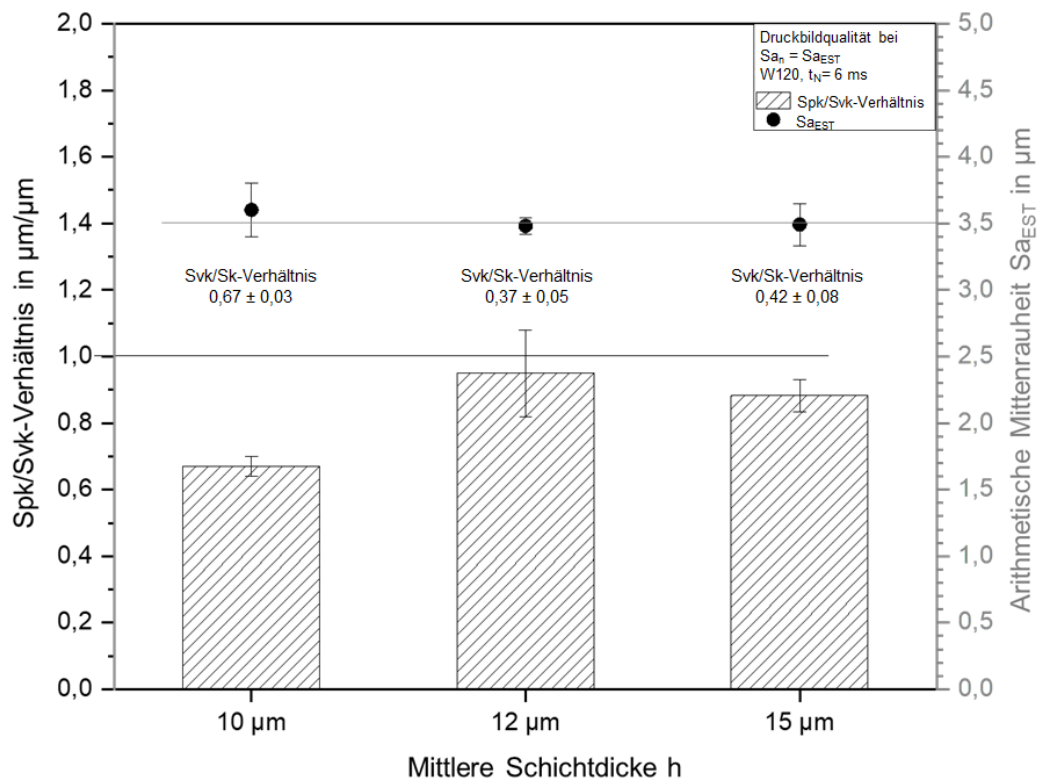


Abbildung 7-4: Einfluss des Auftrags der mittleren Schichtdicke h auf die voraussichtliche subjektive Wertigkeit der Druckbildqualität anhand der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} , dem Spk/Svk-Verhältnisses und dem Svk/Sk-Verhältnisses.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} entspricht der Tintentopographie, die, unabhängig von der mittleren Schichtdicke h , ihre charakteristische wellenförmige Struktur auf Basis der perlenförmigen Anordnung der Druckpunkte annimmt. Das geringe Spk/Svk-Verhältnis der definierten Substrattopographie W120 mit einer mittleren Schichtdicke h von 10 µm wird die Druckbildqualität voraussichtlich negativ beeinflussen. Durch den dominierenden Riefenanteil Svk werden die Druckpunkte wahrscheinlich geringfügig deformiert und nicht in gleichmäßig runder Form vorliegen. Die Kapillarkräfte ziehen den Druckpunkt entlang der Täler. Das Druckbild wird vermutlich an Schärfe einbüßen. Zusätzlich ist das Svk/Sk-Verhältnis vergleichsweise hoch, sodass ganzheitlich betrachtet die Substrattopographie eine ungleichmäßige, stärker ausgeprägte wellenförmige Topographie besitzt. Dieses wird sich voraussichtlich negativ auf die Druckbildqualität auswirken. Das nahe 1 µm/µm liegende Spk/Svk-Verhältnis der definierten Substrattopographie W120 mit einer mittleren Schichtdicke h von 12 µm wird die Druckbildqualität voraussichtlich positiv beeinflussen. Die Topographie ist mit einem gleichmäßigen Anteil an Tälern und Spitzen durchzogen. Die Druckpunkte liegen wahrscheinlich in einem annähernd runden Zustand vor, wodurch das Druckbild exakt abgebildet wird. Zusätzlich liegt das Svk/Sk-Verhältnis vergleichsweise niedrig, sodass

ganzheitlich betrachtet die Substrattopographie eine gleichmäßige, schwächer ausgeprägte wellenförmige Topographie besitzt. Dieses wird sich voraussichtlich positiv auf die Druckbildqualität auswirken.

Dies deutet darauf hin, dass eine zu geringe mittlere Schichtdicke h die Tinte auf einem Strukturelement verlangsamt und somit die Druckbildqualität negativ beeinflusst. Der unabhängig geringe Sa -Wert bei unterschiedlichen mittleren Schichtdicken h kombiniert die entsprechende, mögliche Druckbildqualität mit einem sehr guten haptischen Empfinden.

7.2.4 Parameterstudie zur Auftragsform

Der Einfluss der Auftragsform auf die voraussichtliche Druckbildqualität wird durch das selektive und das flächige Bedrucken einer undefinierten Substrattopographie WsIs analysiert. Das selektive Bedrucken nutzt dazu die Nivellierungszeit t_N von 6 Millisekunden und einem mittleren Auftrag der mittleren Schichtdicke h von circa 8 μm . Demgegenüber steht das flächige Bedrucken, das bei einer Nivellierungszeit t_N von 60 Sekunden und einem mittleren Auftrag der mittleren Schichtdicke h von 8 μm durchgeführt wird. Aus diesem Grund wird die mögliche Druckbildqualität dieser beiden Einstellungen näher betrachtet.

In den vorangegangenen Versuchen, in denen die Glättungsverläufe der undefinierten Substrattopographien WsIs beim selektiven und beim flächigen Bedrucken untersucht wurden, zeigte sich, dass die minimale arithmetische Mittenrauheit Sa_{EST} unabhängig von der Auftragsform bei circa 3,8 μm liegt, Abb. 7-5. Das haptische Empfinden ist nach der Glättung bei beiden Auftragsformen identisch. Die undefinierten Substrattopographie WsIs besitzt nach dem selektiven Bedrucken ein Spk/Svk -Verhältnis von circa 1,0 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit 0,76 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ gering ausgeprägt, Abb. 7-5.

Die undefinierten Substrattopographie WsIs liegt nach dem flächigen Bedrucken bei einem Spk/Svk -Verhältnis von circa 0,80 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$. Der Riefenanteil dominiert die Substrattopographie. Das Svk/Sk -Verhältnis ist mit 0,50 $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ gering ausgeprägt, Abb. 7-5.

Die arithmetische Mittenrauheit Sa_n , die sich schlussendlich eingestellt hat, liegt über der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} der Tintentopographie. Die charakteristische wellenförmige Struktur auf Basis der perlenförmigen Anordnung der Druckpunkte wird durch die dominierende Substrattopographie stetig übertroffen, da der Neigungswinkel für die geringe mittlere Schichtdicke h von 8 μm nicht ausreicht, um die Tinte in der vorgegebenen Nivellierungszeit t_N zum Fließen zu bringen. Das geringe Spk/Svk -Verhältnis des flächigen Bedruckens wird die Druckbildqualität voraussichtlich negativ beeinflussen. Durch den dominierenden Riefenanteil Svk werden die Druckpunkte wahrscheinlich geringfügig deformiert und nicht in gleichmäßig runder Form vorliegen. Die Kapillarkräfte ziehen den Druckpunkt vermutlich entlang der Täler. Das Druckbild wird voraussichtlich an Schärfe einbüßen. Zwar ist die wellenförmige Struktur ungleichmäßig ausgeprägt, jedoch ist das

Svk/Sk-Verhältnis vergleichsweise niedrig, sodass ganzheitlich betrachtet die Substrattopographie eine ungleichmäßige, schwächer ausgeprägte wellenförmige Topographie besitzt. Dieses wird sich voraussichtlich positiv auf die Druckbildqualität auswirken. Das bei $1\text{ }\mu\text{m}/\mu\text{m}$ liegende *Spk/Svk*-Verhältnis des selektiven Bedruckens wird die Druckbildqualität voraussichtlich zusätzlich positiv beeinflussen. Die Topographie ist mit einem gleichmäßigen Anteil an Tälern und Spitzen durchzogen. Die Druckpunkte liegen wahrscheinlich in einem annähernd runden Zustand vor, wodurch das Druckbild exakt abgebildet wird. Zwar ist die wellenförmige Struktur gleichmäßig ausgeprägt, jedoch ist das *Svk/Sk*-Verhältnis vergleichsweise hoch, sodass ganzheitlich betrachtet die Substrattopographie eine gleichmäßige, stärker ausgeprägte wellenförmige Topographie besitzt. Dieses wird sich voraussichtlich positiv auf die Druckbildqualität auswirken.

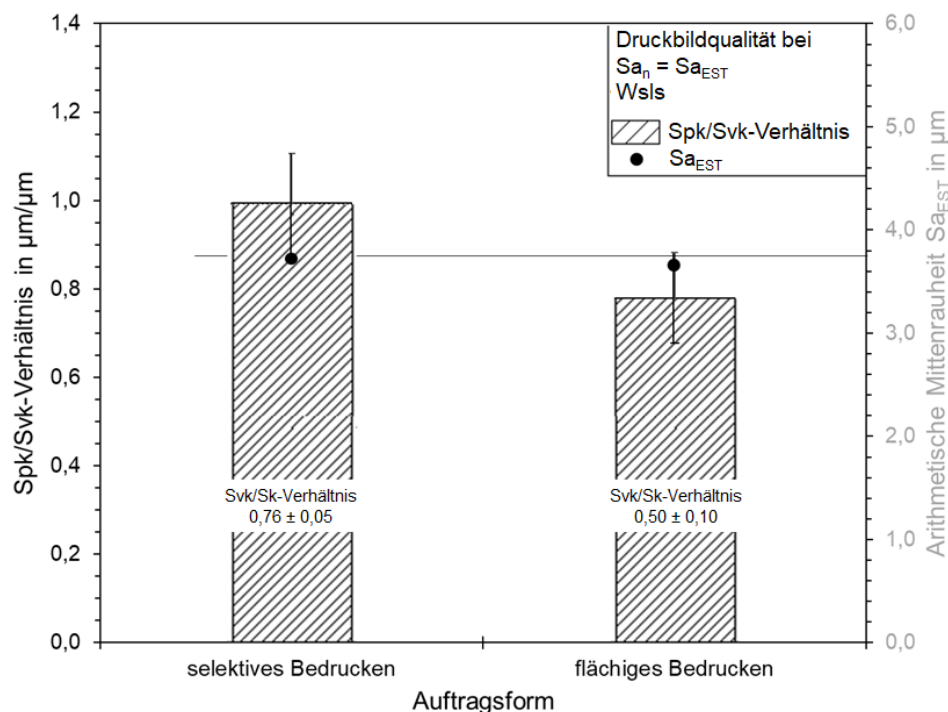


Abbildung 7-5: Einfluss der Auftragsform auf die voraussichtliche subjektive Wertigkeit der Druckbildqualität anhand der arithmetischen Mittenrauheit Sa_{EST} , dem *Spk/Svk*-Verhältnisses und dem *Svk/Sk*-Verhältnisses.

Es ist zu erwarten, dass die Druckbildqualität nach dem Glättungsdurchgang bei den unterschiedlichen Auftragsformen gut ist, die anfängliche Substrattopographie jedoch einen geringen Einfluss besitzt. Der geringe Sa -Wert kombiniert die Druckbildqualität mit einem sehr guten haptischen Empfinden. Das flächige Bedrucken ist im Vergleich weniger aufwendig als das selektive Bedrucken, da das selektive Bedrucken mit einem vorherigen Abscannen der Fläche verbunden ist und damit zusätzlich Zeit aufgewendet werden muss.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Automobilindustrie ist geprägt von mehreren Zukunftstrends. Einer davon ist die Verdichtung der Bevölkerung in Großstädten und die zunehmende Urbanisierung. Dem begegnet die Automobilindustrie mit neuen Mobilitätskonzepten, wie dem Carsharing, welches steigender Beliebtheit in der Gesellschaft findet. (Schade W, Kühn A., 2012) Der Wunsch nach persönlicher Selbstverwirklichung, die sich beispielsweise in Form der Personalisierung von Bauteilen im Fahrzeug ausdrückt, bleibt trotz dieses Wandels bestehen. Diese gesellschaftliche Entwicklung stellt die Industrie vor große Herausforderungen. Aktuell können Bauteile mit einer Stückzahl eins nur aufwendig und per Hand hergestellt werden. Das selektive Lasersintern ermöglicht eine freie Gestaltung der Bauteilgeometrie mit der Einschränkung, dass die Bauteile einen monochromen Farbton besitzen. Zusätzlich wirkt die Haptik der Oberfläche rau. Hingegen bietet der Inkjet-Druck die Möglichkeit das kundenspezifische Bauteil durch ein visuelles Farbfinish bis hin zur Fotoqualität nach persönlichem Wunsch umzusetzen. Die Kombination dieser beiden Technologien erlaubt die Realisierung der individuellen Bauteilgeometrie mit personalisiertem Farbfinish der Bauteiloberfläche. In der wissenschaftlichen Literatur gibt es für diese Form der Personalisierung bisher keine Ansätze, die beschreiben, wie die Potentiale der beiden Technologien kombiniert werden können.

Aus diesem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit die Auswirkung des mehrlagigen Bedruckens auf das Glättungsverhalten strukturierter Substrattopographien durch den Inkjet-Druck analysiert, womit eine Grundlage für die Kombination dieser beiden Technologien gelegt wird.

Hierfür wurde zunächst ein mathematisches Modell entwickelt, welches den Glättungsverlauf mit zunehmendem Druckdurchgang beschreibt. Das entwickelte Modell der partiellen Materialverteilung unterstützt das Verständnis dieses Glättungsverlaufs, indem die Schichtdickenverteilung des Tintenfilms auf den Spitzen und in den Tälern nach jedem einzelnen Druckdurchgang durch die gemessenen Rauheit R_z berechnet wird. Im Anschluss wurde die Auswirkung der in dem Modell der Glättung beschriebenen Einflussgrößen, Schichtdicke und Nivellierungszeit, sowie der Einfluss der Substrattopographie an sich und der Auftragsform des Tintenfilms auf den Glättungsverlauf simulativ und experimentell analysiert. Darüber hinaus wurden erste Ansätze zur Qualitätssicherung erarbeitet, mit denen die subjektive Wahrnehmung des visuell bewerteten Druckbilds durch objektive Rauheitskenngrößen ausgedrückt werden kann.

Durch die Erkenntnisse aus den Untersuchungen ist der Anwender in der Lage mit dem erarbeiteten Modell der Glättung die geringste Anzahl an Druckdurchgängen bis zur vollständigen Glättung der Substrattopographie vorab zu bestimmen. Zudem hat er die Möglichkeit, durch die Kenntnisse über die Auswirkung der einzelnen Einflussgrößen, bewusst

auf den Glättungsverlauf einzuwirken und diesen gezielt zu steuern. Erste Ansätze der Qualitätssicherung durch objektive Rauheitskenngrößen erlauben dem Anwender zudem, Ausschussteile, die ein ungenügende Druckbildqualität des visuellen Farbfinishes vermuten lassen, frühzeitig aus dem Prozess auszuleiten.

Die Erkenntnisse aus der vorliegenden Arbeit bieten die Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Rauheitsreduktion mittels Inkjet-Drucks. Das in Kapitel 5.1 entwickelte mathematische Modell der Glättung, das die Rauheitsreduktion von lasergesinterten Substrattopographien mit zunehmenden Druckdurchgang beschreibt, wurde aus den Erkenntnissen des Modells von De Gennes (Gennes et al., 2004) abgeleitet. Das neu entwickelte Modell zeigt, dass die arithmetische Mittenrauheit S_a mit jedem Druckdurchgang in Abhängigkeit der Einflussgrößen der Schichtdicke und der Nivellierungszeit nahezu exponentiell abnimmt und damit mathematisch beschrieben werden kann. Der zentrale Vorteil dieses Modells liegt darin, dass durch einfache Kenngrößen, die aus der Tinteneigenschaft und dem Inkjet-Druckprozess bestehen, der Glättungsverlauf ausgedrückt wird. Weiteres Forschungspotential ergibt sich aus der Tatsache, dass der Neigungswinkel der Strukturelemente, die die Substrattopographie bilden, nicht berücksichtigt wird. Durch Vernachlässigung des Neigungswinkels kann in den ersten Druckdurchgängen eine geringfügige Abweichung der experimentellen zur berechneten Rauheit bestehen. Dieses zeigt sich besonders bei definierten Zahnstrukturen, wie die Untersuchungen in dieser Arbeit ergaben. Zielführend wäre daher die Erweiterung des Modells der Glättung mit dieser Einflussgröße. Zudem kann die dominierende Wellenlänge der Tintentopographie, die für die Berechnung des Modells der Glättung benötigt wird, aktuell nur aus experimentellen Untersuchungsergebnissen ermittelt werden. Durch die experimentelle Bestimmung der Wellenlänge kann die tatsächliche Wellenlänge zwar exakt abgebildet und demzufolge mögliche Abweichungen in dem Modell eliminiert werden, jedoch ist dieses aufwendig. Die Erweiterung des mathematischen Modells der Glättung mit einem theoretischen Modell zur Beschreibung dieser dominierenden Wellenlänge würde den Aufwand reduzieren und das Modell zusätzlich präzisieren. Weiteres Forschungspotential bietet die Untersuchung der objektiven Rauheitskenngrößen zur Qualitätssicherung aus Kapitel 7. Mit Hilfe dieser kann die Druckbildqualität vorausgesagt werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde gezeigt, dass tendenziell eine Korrelation zwischen der objektiven Rauheitskenngrößen und der subjektiven visuellen Druckbildqualität besteht. Diese Erkenntnis bestätigt, dass die Qualitätssicherung prinzipiell objektiviert werden kann. Bereits eine kleine Veränderung der Substrattopographie beeinflusst die Druckbildqualität. Diese kann mit den objektiven Rauheitskenngrößen jedoch nur tendenziell beschrieben werden. Es ist sinnvoll weitere Kenngrößen zur Objektivierung der visuellen Wahrnehmung der Druckbildqualität heranzuziehen. Dieses würde die Fehleranfälligkeit der Qualitätssicherung reduzieren.

Wird das Modell der Glättung mit dem Neigungswinkel der Strukturelemente, die die Substrattopographie bilden, und der dominierenden Wellenlänge der Tintentopographie ergänzt und mit präziseren Kenngrößen zur Objektivierung der Qualitätssicherung bewertet, kann die Anzahl der benötigten Druckdurchgänge des vorbereitenden additiven Auftrags aus dem Gesamtfertigungsprozess vorab berechnet und die Bauteiloberfläche in einem ersten Schritt haptisch aufbereitet werden. Die folgende Oberflächenveredelung durch das visuelle Farbfinish, die aus dem farbigen Druck besteht, individualisiert das additiv gefertigte Bauteil ohne zusätzliche Arbeitsschritte. Durch die Kombination der additiven Fertigung mit dem anschließenden Inkjet-Druck wird auf den individuellen Kundenwunsch eingegangen und in Zeiten neuer Mobilitätskonzepte eine Möglichkeit zur persönlichen Selbstverwirklichung im Fahrzeug geschaffen.

9 Literaturverzeichnis

- Alexander, M. (1971). Untersuchung über die Benetzbarkeit von Kunststoff-Folien durch Druckfarbe: Forschungsberichte des Landes Nordrhein-Westfalen. Wiesbaden, s.l.: VS Verlag für Sozialwissenschaften. ISBN 9783531021805. <https://doi.org/10.1007/978-3-663-19785-0>
- Atkins, P. W., & de Paula, J. (2013). Physikalische Chemie (5. Aufl.). Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-33247-2. <https://doi.org/10.1002/3527682899>
- Bacchewar, P. B., Singhal, S. K., & Pandey, P. M. (2007). Statistical modelling and optimization of surface roughness in the selective laser sintering process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 1, 35–52. <https://doi.org/10.1243/09544054JEM670>
- Blattmeier, M. (2012). Strukturanalyse von lasergesinterten Schichtverbunden mit werkstoffmechanischen Methoden. [Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Dissertation, 2012]. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag. ISBN 978-3-8348-2500-1. <https://doi.org/10.1007/978-3-8348-2501-8>
- BMW Group. (2018). 3D-Druck ermöglicht individuelle Kühlerblenden für die Motorräder der BMW Motorrad International GS Trophy Zentralasien 2018 [Press release]. Retrieved June 21, 2018, from <https://bit.ly/2K75zbT>
- Böckh, P., & Saumweber, C. (2013). Fluidmechanik: Einführendes Lehrbuch. Berlin Heidelberg: Springer Verlag. ISBN 9783642338922.
- Breuninger, J., Becker, R., Wolf, A., Rommel, S., & Verl, A. (2013). Generative Fertigung mit Kunststoffen: Konzeption und Konstruktion für Selektives Lasersintern. Berlin Heidelberg: Springer. ISBN 9783642243240. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-24325-7>
- Bühler, P., Schlaich, P., & Sinner, D. (2018). Druck: Druckverfahren - Werkstoffe - Druckverarbeitung. Berlin Heidelberg: Springer Vieweg. ISBN 978-3-662-54610-9. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-54611-6>
- Cassie, A. B. D., & Baxter, S. (1944). Wettability of porous surfaces. Transactions of the Faraday Society, 40, 546–551. <https://doi.org/10.1039/TF9444000546>
- Connors, T. E., & Banerjee, S. (1995). Surface analysis of paper. Boca Raton: CRC Press. ISBN 9780849389924.
- Daimler AG. (2016). Wegweisende Zukunftstechnologie Ersatzteile aus dem 3D-Drucker für Lkw und Bus: Mercedes-Benz Lkw und Daimler Busse sind Vorreiter in der 3D-Teileversorgung [Press release]. Retrieved June 21, 2018, from <https://bit.ly/2l8XYYv>

- Danjou, S., & Kohler, P. (2010). Improving part quality and process efficiency in layered manufacturing by adaptive slicing. *Virtual and Physical Prototyping*, 4, 183–188.
<https://doi.org/10.1080/17452759.2010.527010>
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2012). Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft. (DIN EN ISO, 25178-2:2012-09). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Dreher, M. (2018). Die Winklung von AM-Rastern. *Fachzeitschrift Flexo+Tief-Druck* [Internet]. Retrieved November 1, 2018, from <https://bit.ly/2EUyNMR>
- Drummer, D., Hüdler, G., Kühnlein, F., & Rietzel, D. (2010). Untersuchung der Materialalterung bei pulverbasierten Schichtbauverfahren. *RTejournal - Forum für Rapid Technologie*, 7. <https://bit.ly/2DHI7QN>
- Duineveld, P. C. (2003). The stability of ink-jet printed lines of liquid with zero receding contact angle on a homogeneous substrate. *Journal of Fluid Mechanics*, 477, 175–200.
<https://doi.org/10.1017/S0022112002003117>
- EOS GmbH. (2018). PA 2200 Performance 1.0 | PA12 [Produktdatenblatt]. Internet.
<https://bit.ly/2OOoGMN>
- Fowkes, F. M. (1964). Attractive forces at interfaces. *Industrial & Engineering Chemistry*, 12, 40–52. <https://doi.org/10.1021/ie50660a008>
- Fox, J. C., Moylan, S. P., & Lane, B. M. (2016). Effect of Process Parameters on the Surface Roughness of Overhanging Structures in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 45, 131–134. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.347>
- Frenzel, R., Synytska, A., Nitschke, M., Stamm, M., Simon, F., & Grundke, K. (2010). Ultrahydrophobe Oberflächen durch gezieltes Grenzflächendesign. *Chemie Ingenieur Technik*, 3, 297–308. <https://doi.org/10.1002/cite.200900100>
- Fuchs, I., Beyer, M., Ghozzi, A., & Brendler, B. (2013). Grundlegende Untersuchungen zur Bedruckbarkeit verschiedener Holzwerkstoffsubstrate sowie zum Schutz des Druckes: Forschungsprojekt, IHD-Brief 36 [Bericht]. Internet. <https://bit.ly/2OFHI7D>
- Gaydushek, M., & Finsterwalder, F. (2016), DE102016007817A1. Verfahren zum Glätten einer Oberfläche eines Bauteils. München, Deutschland: Deutsches Patent- und Markenamt.
- Gaydushek, M., Simon, M., Finsterwalder, F., Spiehl, D., & Dörsam, E. (2017). Einfluss und Charakterisierung der Oberflächenstruktur von per selektivem Laser-Sintern hergestellten Bauteilen zur Qualifizierung für den Digitaldruck. *Kunststofftechnik*, 4, 255–280.
<https://tinyurl.com/yxxwmmho>

- Gebhardt, A. (2013). Generative Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D Drucken für Prototyping; Tooling; Produktion (1. Aufl.). München: Carl Hanser Fachbuchverlag. ISBN 978-3-446-43651-0.
- Gennes, P.-G. d., Brochard-Wyart, F., & Quéré, D. (2004). Capillarity and wetting phenomena: Drops, bubbles, pearls, waves. New York, NY: Springer. ISBN 9780387005928. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21656-0>
- Grimm, T., Wiora, G., & Witt, G. (2015). Characterization of typical surface effects in additive manufacturing with confocal microscopy. Surface Topography: Metrology and Properties. <https://doi.org/10.1088/2051-672X/3/1/014001>
- Hartmann, C., & Schneider, A. (2008). Rasterblock: Weiten, Winkel und Effekte punktgenau gestalten (1. Aufl.). Mainz: Schmidt. ISBN 9783874397650.
- Heidelberger Druckmaschinen AG. (2017). Design your car“ - Heidelberg auf der IAA 2017 Technologiepartner der Automobilindustrie [Press release]. Retrieved June 30, 2018, from <https://bit.ly/2KiqLjj>
- Hoath, S. D. (2016). Fundamentals of inkjet printing: The science of inkjet and droplets. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN 978-3-527-68473-1. <https://doi.org/10.1002/9783527684724>
- Holman, R. K., Cima, M. J., Uhland, S. A., & Sachs, E. (2002). Spreading and infiltration of inkjet-printed polymer solution droplets on a porous substrate. Journal of Colloid and Interface Science, 2, 432–440. <https://doi.org/10.1006/jcis.2002.8225>
- Hue, P. (1998). Progress and Trends in Ink-jet Printing Technology. Journal of Imaging Science and Technology, 1, 49–62. <https://bit.ly/2zbw4vF>
- ISO Internationale Organisation für Normung (2013). Drucktechnik - Prozesskontrolle für die Herstellung von autotypischen Farbausätzen, Prüfdrucken und Auflagendrucken. (ISO, 12647-1:2013-12). Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- Jang, D., Kim, D., & Moon, J. (2009). Influence of fluid physical properties on ink-jet printability. Langmuir, 5, 2629–2635. <https://doi.org/10.1021/la900059m>
- Kaddar, W. (2010). Die generative Fertigung mittels Laser-Sintern: Scanstrategien, Einflüsse verschiedener Prozessparameter auf die mechanischen und optischen Eigenschaften beim LS von Thermoplasten und deren Nachbearbeitungsmöglichkeiten. [Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Dissertation, 2010]. Universitätsbibliothek. [<https://bit.ly/2sNJnff>].
- Kalweit, A., Paul, C., Peters, S., & Wallbaum, R. (2012). Handbuch für Technisches Produktdesign. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-642-02641-6. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-02642-3>

- Kipphan, H. (2000). Handbuch der Printmedien: Technologien und Produktionsverfahren. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. ISBN 9783540669418.
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-57024-7>
- Klein, R., Miletic, M., Meder, G., Eckert, D., & Großmann, H. (2011). Papiereinfluss auf die Entstehung von Druckunruhe (Mottling) im Bogenoffsetdruck - Teil 1: Druckversuch und drucktechnische Bewertung. Wochenblatt für Papierfabrikation, 5, 324–328.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1488.4886>
- Krolle, A. (2014). Benetzbarkeit der Papieroberfläche: Charakterisierung der Papieroberfläche für nachfolgende Verarbeitungsprozesse. [Zugl.: Graz, Tech. Univ., Dissertation, 2014]. München: Dr. Hut. ISBN 978-3843918664. [<https://bit.ly/2DNLBTO>].
- Kühnlein, F., Rietzel, D., & Drummer, D. (2012). Untersuchung der richtungsabhängigen mechanischen Eigenschaften und Bruchursachen maskengesinterter PA12-Bauteile. Kunststofftechnik, 8. <https://tinyurl.com/qws8v3m>
- Lake, M. (2017). Oberflächentechnik in der Kunststoffverarbeitung: Vorbehandeln, Beschichten, Bedrucken, Funktionalisieren, Prüfen (2. Aufl.). München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN 3446452338. <https://doi.org/10.3139/9783446449497>
- Launhardt, M., Wörz, A., Loderer, A., Laumer, T., Drummer, D., Hausotte, T., & Schmidt, M. (2016). Detecting surface roughness on SLS parts with various measuring techniques. Polymer Testing, 53, 217–226. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2016.05.022>
- Magdassi, S. (2010). The chemistry of inkjet inks. Hackensack, NJ: World Scientific. ISBN 978-9813203495. <https://doi.org/10.1142/6869>
- Marmur, A. (2003). Wetting on Hydrophobic Rough Surfaces: To Be Heterogeneous or Not To Be? Langmuir, 20, 8343–8348. <https://doi.org/10.1021/la0344682>
- Martha, A. M., & Köhler, P. (2011). Ansätze zur Verbesserung von Qualität und Wirtschaftlichkeit bei generativen Verfahren durch Optimierung des Pre-Processes. RTejournal - Forum für Rapid Technologie, 8.
<https://www.rtejournal.de/ausgabe8/2994/Martha.pdf>
- Martorana, E., Ziegler, H., a Campo, F., & Jühe, H.-H. (2006). Ursachen von Missing Dots im Tiefdruck. Wochenblatt für Papierfabrikation, 11-12, 690–698. <https://bit.ly/33QbWcN>
- Meichsner, G., Mezger, T. G., & Schröder, J. (2016). Lackeigenschaften messen und steuern (2. überarbeitete Aufl.). Hannover: Vincentz Network GmbH & Co.KG. ISBN 9783866306356.

- Mielonen K. (2015). The effect of cationic-anionic polyelectrolyte multilayer surface treatment on inkjet ink spreading and print quality. [Zugl.: Finnland, Univ., Dissertation, 2015]. Universitätsbibliothek. ISBN 978-952-265-887-6.
- Mimaki Engineering Co., L. (2012). Material Safety Data Sheets MSDS: UVink LH-100 White [Produktdatenblatt]. Internet. <https://bit.ly/2SBpy7e>
- Moore, W. J., & Paterno, W. (1990). Grundlagen der Physikalischen Chemie. Berlin/NewYork: de Gruyter. ISBN 9783110099416.
<https://doi.org/10.1002/pauz.19910200215>
- Mu, L., Hu, Z., Zhong, Z., Jiang, C., Wang, J., Peng, J., & Cao, Y. (2017). Inkjet-printing line film with varied droplet-spacing. Organic Electronics, 51, 308–313.
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2017.08.012>
- Ohnishi, M., Hashizume, H., & Hishida, Y. (2009), US2009244230A1. Ultraviolet curing inkjet printer, printing method used in ultraviolet curing inkjet printer, and head. Washington,DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- Pehlivan, B. (2018). Einfluss der Untergrundstruktur und das Verhalten des Druckmediums auf das Glättresultat von lasergesinterten PA12 Bauteilen mittels Inkjet-Technologie. TU Dortmund, Daimler AG [Zugl.: Dortmund, Tech. Univ., betreute Bachelorarbeit, 2018], unveröffentlicht.
- Pham, D. T., Dotchev, K., & Yusoff, W. (2007). Improvement of part surface finishing in laser sintering by experimental design optimisation (DOE). Third Virtual Conference on Innovative Production Machines and Systems, Florida. <https://bit.ly/2rHgFQt>
- Qu, Z. C., Chen, G. X., Tang, B. L., & Wen, S. S. (2011). Study on Model of Dot Gain in Ink-Jet Printing. Advanced Materials Research, 236-238, 1405–1409.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.236-238.1405>
- Rapp, C. (2017). Hydraulik für Ingenieure und Naturwissenschaftler: Ein Kurs mit Experimenten und Open-Source Codes. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. ISBN 9783658186197.
- Rechtenwald, T., Frick, T., & Schmidt, M. (2010). Potenzial des Laserstrahlsinterns von PEEK zur Erzeugung kleiner Bauteilstrukturen. RTejournal - Forum für Rapid Technologie, 7. <https://bit.ly/34GTrZn>
- Resch K., Wallner, G., & Lang, R. (2008). Cross-linking behavior of UV-curable acrylate resins. Kunststofftechnik, 4. <https://bit.ly/2BdjJWW>

- Reynolds, O. (1886). On the Theory of Lubrication and Its Application to Mr. Beauchamp Tower's Experiments, Including an Experimental Determination of the Viscosity of Olive Oil. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*.
<https://doi.org/10.1098/rstl.1886.0005>
- Roggow, M. (2017). Optimierung der Oberflächenrauheit von lasergesinterten Bauteilen mittels selektivem Inkjet-Verfahren. Westsächsische Hochschule Zwickau, Daimler AG [Zugl.: Zwickau, FH, betreute Diplomarbeit, 2017], unveröffentlicht.
- Rulison, C. (2007). Optimierung von Beschichtungen in der Automobilindustrie: Das Zusammenspiel von Adhäsionsenergie, Grenzflächenspannung und dem Spreitungskoeffizienten [Applikationsreport]. Internet. <https://bit.ly/2Mc4DnU>
- Sauer, A. (2005). Optimierung der Bauteileigenschaften beim Selektiven Lasersintern von Thermoplasten. [Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Dissertation, 2005]. Aachen: Shaker. ISBN 3-8322-4428-x.
- Sauer, A., & Witt, G. (2004). Optimierung der Eigenschaften von thermoplastischen Lasersinter-Bauteilen. *RTeJournal*, 2. <https://bit.ly/2DEQyw8>
- Savva, N., & Kalliadasis, S. (2010). Influence of spatial heterogeneities on spreading dynamics. *Journal of Physics: Conference Series*. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/216/1/012017>
- Schade W, Kühn A. (2012). Neue Mobilitätskonzepte – die Zukunft der Automobilindustrie? [Internet]. <https://bit.ly/2CK4uSE>
- Schmid, M., & Wegener, K. (2016). Additive Manufacturing: Polymers Applicable for Laser Sintering (LS). *Procedia Engineering*, 149, 457–464.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.692>
- Sefiane, K. (2014). Patterns from drying drops. *Advances in Colloid and Interface Science*, 206, 372–381. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2013.05.002>
- Shaker, M., & Salahinejad, E. (2018). A combined criterion of surface free energy and roughness to predict the wettability of non-ideal low-energy surfaces. *Progress in Organic Coatings*, 119, 123–126. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2018.02.028>
- Sigloch, H. (2014). *Technische Fluidmechanik* (6. Aufl.). Berlin Heidelberg: Springer-Verlag. ISBN 9783642542923. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-44635-4>
- Siregar, D. P., Kuerten, J. G. M., & van der Geld, C. W. M. (2013). Numerical simulation of the drying of inkjet-printed droplets. *Journal of Colloid and Interface Science*, 392, 388–395. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2012.09.063>

- Soltman, D., & Subramanian, V. (2008). Inkjet-printed line morphologies and temperature control of the coffee ring effect. *Langmuir*, 5, 2224–2231.
<https://doi.org/10.1021/la7026847>
- Spath, S. (2014). Einfluss der Partikelgröße von Granulaten auf deren Verarbeitung im 3D-Druck-Verfahren und die Beschaffenheit von 3D-gedruckten Implantatkeramiken. [Zugl.: Rostock, Univ., Fak. für Maschinenbau und Schiffstechnik, Dissertation, 2014]. Rostock: Universitätsbibliothek. https://doi.org/10.18453/rosdok_id00001411
- Tanner, L. H. (1979). The spreading of silicone oil drops on horizontal surfaces. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 9, 1473–1484. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/12/9/009>
- Tumor, I. Y., Thompson, D. C., Wood, K. L., & Crawford, R. H. (1998). Characterization of surface fault patterns with application to a layered manufacturing process. *Journal of Manufacturing Systems*, 1, 23–36. [https://doi.org/10.1016/S0278-6125\(98\)80007-1](https://doi.org/10.1016/S0278-6125(98)80007-1)
- Wegner, A., & Witt, G. (2012). Betrachtung zur Pulvernutzungsdauer beim Laser- Sintern und Einfluss der Prozessführung auf die Entstehung von Ausschussbauteilen. *RTEjournal*, 9, Article 3356. <https://bit.ly/2qd5tdU>
- Wenzel, R. N. (1936). Resistance of solid surfaces to wetting by water. *Industrial & Engineering Chemistry*, 8, 988–994. <https://doi.org/10.1021/ie50320a024>
- Wijshoff, H. (2010). The dynamics of the piezo inkjet printhead operation. *Physics Reports*, 4-5, 77–177. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2010.03.003>
- Wijshoff, H. (2018). Drop dynamics in the inkjet printing process. *Current Opinion in Colloid & Interface Science*, 36, 20–27. <https://doi.org/10.1016/j.cocis.2017.11.004>
- Yoganathan, M. (2017). Bestimmung des Glättungsgrades mittels flächigem Digitaldruck. Hochschule Aalen, Daimler AG [Zugl.: Aalen, FH, betreute Bachelorarbeit, 2017], unveröffentlicht.
- Yoo, H., & Kim, C. (2015). Experimental studies on formation, spreading and drying of inkjet drop of colloidal suspensions. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 468, 234–245. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2014.12.032>
- Young, T. (1805). An Essay on the Cohesion of Fluids. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 95, 65–87. <https://doi.org/10.1098/rstl.1805.0005>
- Yusoff, W. (2007). An investigation of the “Orange Peel” Phenomenon. [Zugl.: Wales, Univ., Dissertation., 2007]. UMI Dissertation Publishing, UMI U584935: ProQuest LLC 2013. [<https://bit.ly/2H022iB>].
- Zapka, W. (2018). Handbook of Industrial Inkjet Printing: A Full System Approach. Weinheim: Wiley. ISBN 9783527338320. <https://doi.org/10.1002/9783527687169>

Zisman, W. A., & Fowkes, F. W. (1964). Contact angle, wettability, and adhesion.

Washington, D.C.: American Chemical Soc. <https://doi.org/10.1021/ba-1964-0043.fw001>

10 Verzeichnis betreuter Abschlussarbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation entstanden bei der Daimler AG und an der Forschung beteiligten Instituten in den Jahren von 2016 bis 2018 unter wesentlicher wissenschaftlicher, fachlicher und inhaltlicher Anleitung der Autorin die im Folgenden aufgeführten studentischen Arbeiten, Tab. 10-1. In diesen Arbeiten wurden verschiedene Fragestellungen zur Reduzierung der Oberflächenrauheit von lasergesinterten Bauteilen untersucht. Die Rohdaten der Studienarbeiten sind in Teilen in die vorliegende Arbeit eingeflossen. Die Autorin dankt allen Studierenden für ihr Engagement bei der Unterstützung dieser wissenschaftlichen Arbeit.

Tabelle 10-1: Auflistung der von der Autorin betreuten Abschlussarbeiten im Zeitraum 2016 bis 2018.

<i>Studierende/r</i>	<i>Institut</i>	<i>Abschlussarbeit</i>
Pehlivan, B.	TU Dortmund Fakultät Maschinenbau Lehrstuhl für Werkstofftechnologie	Einfluss der Untergrundstruktur und das Verhalten des Druckmediums auf das Glättresultat von lasergesinterten PA12 Bauteilen mittels Inkjet-Technologie, abgegeben im Februar 2018
Roggow, M.	Westsächsische Hochschule Zwickau Fakultät Automobil- und Maschinenbau	Optimierung der Oberflächenrauheit von lasergesinterten Bauteilen mittels selektivem Inkjet-Verfahren, abgegeben im Februar 2017
Yoganathan, M.	Hochschule Aalen Fakultät Maschinenbau	Bestimmung des Glättungsgrades mittels flächigem Digitaldruck, abgegeben im August 2017